# Einfluß einiger Rührerformen auf das Mischen von Flüssigkeiten

Von der Technischen Hochschule zu Breslau

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte

**Dissertation**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. **Alfred Rohde**

aus Breslau

Referent:
Professor **Krauß**

Korreferent:
Professor Dr.-Ing. **Heinel**

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Februar 1934

Würzburg 1934

Buchdruckerei Konrad Triltsch

# Einfluß einiger Rührerformen auf das Mischen von Flüssigkeiten

Von der Technischen Hochschule zu Breslau

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte

**Dissertation**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. **Alfred Rohde**

aus Breslau

Referent:
Professor **Krauß**

Korreferent:
Professor Dr.-Ing. **Heinel**

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Februar 1934

Würzburg 1934

Buchdruckerei Konrad Triltsch

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545806_0041

# Inhalt:


| | | Seite |
|---|---|---|
| Einleitung | | 1 |
| Abschnitt 1 | Mischbewegung | 1 |
| Abschnitt 2 | Rotationsbewegung | 5 |
| | A. Gleichförmige Winkelgeschwindigkeit der Flüssigkeit | 5 |
| | B. Ungleichförmige Winkelgeschwindigkeit der Flüssigkeit | 8 |
| | C. Einfluß der Rotationsbewegung auf die Mischbewegung | 9 |
| Abschnitt 3 | Erzeugen der Mischbewegung | 11 |
| Abschnitt 4 | Mischversuche | 18 |
| | A. Versuchsanordnung und Meßverfahren | 18 |
| | B. Zentrifugalrührer | 22 |
| | C. Achsialrührer | 25 |
| Zusammenfassung | | 30 |



Die Durchführung der vorliegenden Arbeit war mir nur dadurch möglich, daß mir von Herrn Professor Krauß die gesamten Einrichtungen seines Lehrstuhles für Wasserkraftmaschinen und -Anlagen in entgegenkommender Weise für die Vornahme der Mischversuche und deren Auswertung zur Verfügung gestellt wurden. Es ist mir eine angenehme Pflicht Herrn Professor Krauß hierfür ebenso wie für das rege Interesse und die mannigfachen Anregungen, mit denen er die Arbeit förderte, zu danken.

# Zeichen-Erklärung.

| | |
|---|---|
| V | Flüssigkeitsvolumen |
| N | Wellenleistung |
| Nges. | zugeführte Leistung |
| Q | Fördermenge |
| H | Förderhöhe |
| MV | Mischverhältnis $= \frac{\text{Volumen des in der Probe enthaltenen Öles}}{\text{Volumen der entnommenen Probe}}$ |
| $MV_R$ | Mischverhältnis am Rande des Behälters |
| $\gamma_1$ | spezifisches Gewicht der leichteren Flüssigkeit |
| $\gamma_2$ | spezifisches Gewicht der schwereren Flüssigkeit |
| $v_0$ | Mischgeschwindigkeit |
| v | relative Geschwindigkeit des leichteren zum schwereren Medium |
| g | Erdbeschleunigung |
| t | Zeit |
| h | Flüssigkeitshöhe |
| $h_1$ | Höhe des Rotationsparaboloids |
| $h_s$ | $= \frac{v_0^2}{2p}$ = Sinktiefe |
| d | Behälterdurchmesser |
| $d_R$ | Durchmesser des Rührers |
| b | Rührerbreite |
| p | Auftriebsbeschleunigung |
| p′ | $= \frac{1}{t} \int_{t=0}^{t=t_1} p\,dt$ Auftriebsbeschleunigung unter Berücksichtigung des Flüssigkeitswiderstandes |
| $n_s$ | $= \frac{n\sqrt{N}}{H^{5/4}}$ spezifische Drehzahl |
| $\xi_1$ | Berichtigungsfaktor des Strömungsquerschnittes beim Achsialrührer |
| $\xi_2$ | Berichtigungsfaktor des Strömungsquerschnittes beim Zentrifugalrührer |
| $\zeta_1$ | Berichtigungsfaktor der Widerstandshöhe beim Achsialrührer |
| $\zeta_2$ | Berichtigungsfaktor der Widerstandshöhe beim Zentrifugalrührer |
| c | absolute Geschwindigkeit |
| w | relative Geschwindigkeit |
| u | Umfangsgeschwindigkeit |
| $\omega$ | Winkelgeschwindigkeit |
| $\alpha$ | Winkel zwischen c und u |
| $\beta$ | Winkel zwischen w und der negativen u-Richtung |

Indices:

| | |
|---|---|
| 0 | kurz vor dem Laufradeintritt |
| 1 | kurz hinter dem Laufradeintritt |
| 2 | kurz vor dem Laufradaustritt |
| 3 | kurz hinter dem Laufradaustritt |
| u | Komponente in Richtung von u |
| m | in den Meridianschnitt fallende Komponente |
| v | zum Verdränger gehörig |

# Einleitung.

Das Anwendungsgebiet von Rührern in der chemischen und ihr verwandten Industrie ist so überaus mannigfach, und die Voraussetzungen für jeden Betriebsfall so unterschiedlich, daß eine einheitliche Linie hier nur schwer zu ziehen ist. Allen Rührern gemeinsam ist lediglich die Aufgabe, irgend einen Mischvorgang einzuleiten und zu erhalten. Vom rein technischen Standpunkt sei daher nach den Aggregatzuständen unterschieden in

a) Mischen von festem unlöslichem und flüssigem Produkt
b) Mischen von flüssigem mit flüssigem Produkt
c) Mischen von gasförmigem unlöslichem und flüssigem Produkt
d) Mischen von festem mit festem Produkt
e) Mischen von gasförmigem mit gasförmigem Produkt
f) Mischen von festem mit gasförmigem Produkt.

Die praktische Bedeutung der einzelnen Gebiete ist sehr verschieden. Ferner liegen eine Reihe technisch ganz wichtiger Vorgänge auf Grenzgebieten der genannten Einteilung. Daß die Vorrichtungen zur Ausführung dieser Verfahren äußerst verschieden sind, ja teilweise gar nicht mehr als Rührer im üblichen Sinne bezeichnet werden können, liegt auf der Hand. Jedes der Gebiete erfordert Bewegungen mit besonderer Eigenart, und die Vorrichtungen hierzu müssen dafür durchgebildet sein. Vorgänge, bei denen während des Rührens durch irgend einen chemischen Prozeß eine Änderung der physikalischen Eigenschaften der behandelten Produkte hervorgerufen wird, sind als Sonderfälle anzusprechen, für die keine allgemeingültigen Bedingungen aufgestellt werden können. Hier liegt die Wirtschaftlichkeit des Rührers häufig mehr in der vollwertigen Durchführung des chemischen Prozesses als in dem geringsten Arbeitsbedarf, der bei der Beurteilung jedes rein mechanischen Mischvorganges ausschlaggebend ist.

Wenn also im weiteren Verlauf Vorgänge des unter b genannten Gebietes behandelt werden, so ist eine grundlegende Voraussetzung bei allen Erörterungen, daß die zu mischenden Körper während des Rührprozesses ihre physikalischen Eigenschaften beibehalten. Die für die Erfüllung derartiger Aufgaben, also zur Herstellung einer mechanischen Mischung von Flüssigkeiten, verwendeten Vorrichtungen sind in Bauart und Wirkungsweise recht unterschiedlich. Daß sie bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit nicht gleichwertig sind, ist naheliegend; doch fehlen in der Literatur bisher grundlegende Erörterungen hierüber, so daß die Konstruktion sich hier lediglich auf die vorhandenen Erfahrungen stützt, die natürlich oft recht verschiedenartig sein können, weshalb an der einen Stelle dieser an der anderen Stelle jener Bauart und Arbeitsbedingung der Vorzug gegeben wird.

In der vorliegenden Arbeit wird für einige der gebräuchlichsten Rührerformen die Wirkung auf das Mischen von Flüssigkeiten kritisch gegenübergestellt und durch Versuche nachgeprüft.

1. Abschnitt.

# Mischbewegung.

Der Begriff des Mischens sei festgelegt als die Aufgabe in einem Behälter befindliche Flüssigkeiten verschiedenen spezifischen Gewichtes derart zu vermengen, daß an jeder Stelle sämtliche Mischkörper in dem gleichen Raumverhältnis verteilt sind, in dem sie überhaupt in dem Behälter vorhanden sind. Der Fall des Mischens zweier Flüssigkeiten mit gleichem spezifischen Gewicht ist hiervon als Grenzfall anzusehen. Er ist, da er technisch am einfachsten zu beherrschen ist, im Weiteren nicht besonders behandelt. Die Ausführungen über das Mischproblem bei verschiedenem spezifischen Gewicht werden der besseren Übersichtlichkeit wegen auf zwei Flüssigkeiten beschränkt. Für den Fall mehrerer zu mischender Flüssigkeiten gelten sinngemäß die gleichen Verhältnisse.

Zwei Flüssigkeiten verschiedenen spezifischen Gewichts schichten sich im Zustand der Ruhe auf Grund der verschiedenen Energie des Druckes derart übereinander, daß die leichtere Flüssigkeit sich oben, die schwerere unten ansammelt. Die Trennfläche ist im vorliegenden Falle praktisch eine der Oberfläche parallele Ebene. Jedes Flüssigkeitsvolumenteilchen V der leichteren Flüssigkeit mit dem spezifischen Gewicht $\gamma_1$ steigt, sobald es durch irgend eine Kraft in die schwerere mit dem spez. Gewicht $\gamma_2$ gedrückt wird, nach Beendigung dieser Kraftwirkung auf Grund des Auftriebsgesetzes mit der Auftriebskraft $V(\gamma_2 - \gamma_1)$ wieder in das Gebiet der leichteren Flüssigkeit auf. Das Gleiche tritt umgekehrt ein, wenn sich ein Teilchen der schwereren in der leichteren Flüssigkeit befindet. Soll also eine Mischung beider Flüssigkeiten erfolgen, so muß diese Auftriebskraft durch entsprechende Gegenkräfte möglichst unwirksam gemacht werden.

Bekannt ist hierfür ein Verfahren, das bei sehr geringen Mengen in geschlossenem Gefäß häufig angewendet wird, nämlich das Schütteln. Das Gefäß wird hierbei in vertikaler Bewegung rasch beschleunigt und verzögert. Dabei erhält jedes Teilchen der schwereren Flüssigkeit infolge seines größeren spez. Gewichts eine höhere lebendige Kraft als ein gleicher Volumenteil der leichteren Flüssigkeit. Es muß also bei der Aufwärts- und bei der Abwärtsbewegung je eine Durchdringung der beiden Flüssigkeiten stattfinden, da die schwerere Flüssigkeit infolge ihres größeren Impulses jeweils in die äußerste Lage zu strömen bemüht ist. Es ist bekannt, daß bei vielfacher Wiederholung dieses Vorganges eine sehr innige Mischung zu erreichen ist, aber es ist auch ebenso klar, daß diese Art der Durchmischung unwirtschaftlich werden muß, sobald die Massen so groß werden, daß man zum maschinellen Antrieb greift; denn die Bewegung der Flüssigkeit einschließlich des Gefäßes erfordert dann Aufwendungen für mechanische Vorrichtungen und Kraftbedarf, die in keinem Verhältnis zu der erzielten Wirkung stehen. Abgesehen davon, daß dieses Verfahren ohnedies nur in geschlossenen Gefäßen möglich ist, muß seine Anwendung also auf sehr geringe Mengen, deren Bewegung allein mit menschlicher Kraft erfolgen kann, beschränkt bleiben.

In allen übrigen Fällen ist es erforderlich, andere Wege für das Mischen einzuschlagen. Sie bestehen darin, eine Bewegung der gesamten Flüssigkeitsmenge in irgend einer Form mit Ausnahme der in zentrischen Bahnen um die Rührerachse zu verursachen. Die Vorrichtung hierfür ist der Rührer. Abb. 1, 2 und 3 stellen drei Möglichkeiten der Flüssigkeitsbewegung in einem zylindrischen Gefäß dar, die im wesentlichen der Wirkungsweise der heute gebräuchlichen Rührerformen entsprechen, und deren näherer Untersuchung die folgenden Ausführungen dienen sollen.

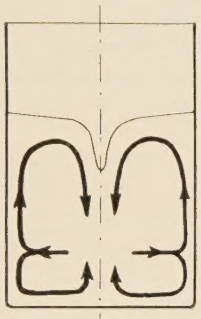


Abb. 1.

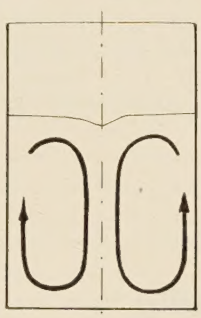


Abb. 2.

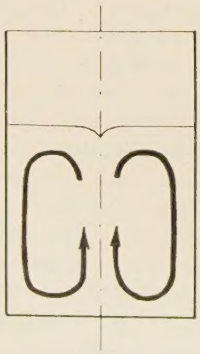


Abb. 3.

Zur Beurteilung der Größe der Geschwindigkeit, die zur Erzeugung einer Mischung erforderlich ist, sei die Bewegung eines Flüssigkeitsvolumen V vom spez. Gew. $\gamma_1$ in einer Flüssigkeit vom spez. Gew. $\gamma_2$ (wobei $\gamma_2 > \gamma_1$) unter der Wirkung einer unter einem Winkel zur Horizontalen gerichteten Geschwindigkeit $v_0$ und der Auftriebskraft $V\ (\gamma_2 - \gamma_1)$ näher betrachtet und zwar zunächst ohne Berücksichtigung des Flüssigkeitswiderstandes. Die Auftriebsbeschleunigung, definiert als $\frac{\text{Kraft}}{\text{Masse}}$, ist dementsprechend

$$p = \frac{V(\gamma_2 - \gamma_1)\, g}{V \cdot \gamma_1} = \frac{(\gamma_2 - \gamma_1)\, g}{\gamma_1},$$

Nach Abb. 4 ist dann:

$$\frac{dx}{dt} = v_0 \cos \varepsilon$$

$$x = v_0 \cos \varepsilon \cdot t \qquad 1)$$

$$\frac{dz}{dt} = v_0 \sin \varepsilon + p \cdot t$$

$$z = v_0 \sin \varepsilon \cdot t + \frac{1}{2} p \cdot t^2 \qquad 2)$$

t aus Gleichung 1) in Gleichung 2) eingesetzt ergibt:

$$z = x \operatorname{tg} \varepsilon + \frac{1}{2} p \frac{x^2}{v_0^2 \cos^2 \varepsilon}$$

$$x^2 + x \sin 2\varepsilon \frac{v_0^2}{p} = z \frac{2 v_0^2 \cos^2 \varepsilon}{p} \qquad 3)$$

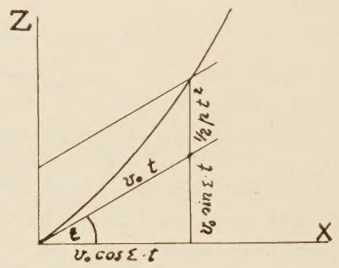



Abb. 4.

Für $\varepsilon = 90^0$ (vertikal gerichtete Geschwindigkeit) ist wie zu erwarten $x = 0$. Die Wegkurve wird also durch die Z-Achse dargestellt. Für $\varepsilon = 0^0$ (horizontal gerichtete Geschwindigkeit) ist

$$x^2 = z \frac{2 v_0^2}{p} \qquad 3a)$$

die Wegkurve also eine Parabel mit dem Parameter $\frac{2 v_0^2}{p}$

Strömt also eine Flüssigkeit vom spezifischen Gewicht $\gamma_2$ mit einem darin befindlichen Flüssigkeitsteilchen V vom spezifischen Gewicht $\gamma_1$ mit der Geschwindigkeit $v_0$ in horizontaler Richtung ($\varepsilon = 0$), so fließt dieses Teilchen V in der strömenden Flüssigkeit auf Grund seines Auftriebes gleichzeitig aufwärts. Seine Wegkurve ist hierbei eine Parabel mit dem Parameter $\frac{2 v_0^2}{p}$

Strömt dieselbe Flüssigkeit mit der Geschwindigkeit $v_0$ in vertikaler Richtung, so fließt ein darin befindliches Flüssigkeitsteilchen V vom spezifischen Gewicht $\gamma_1$ in genau gleicher Richtung jedoch auf Grund seiner Auftriebskraft zusätzlich beschleunigt bezw. verzögert, je nachdem es sich um eine Aufwärts- oder Abwärtsbewegung handelt. Die Zeitwegkurven für an-

fangs benachbarte Teile des spezifischen Gewichts $\gamma_1$ und $\gamma_2$ haben hierbei die Form Abb. 6.

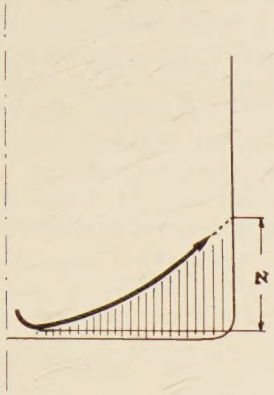



Abb. 5.

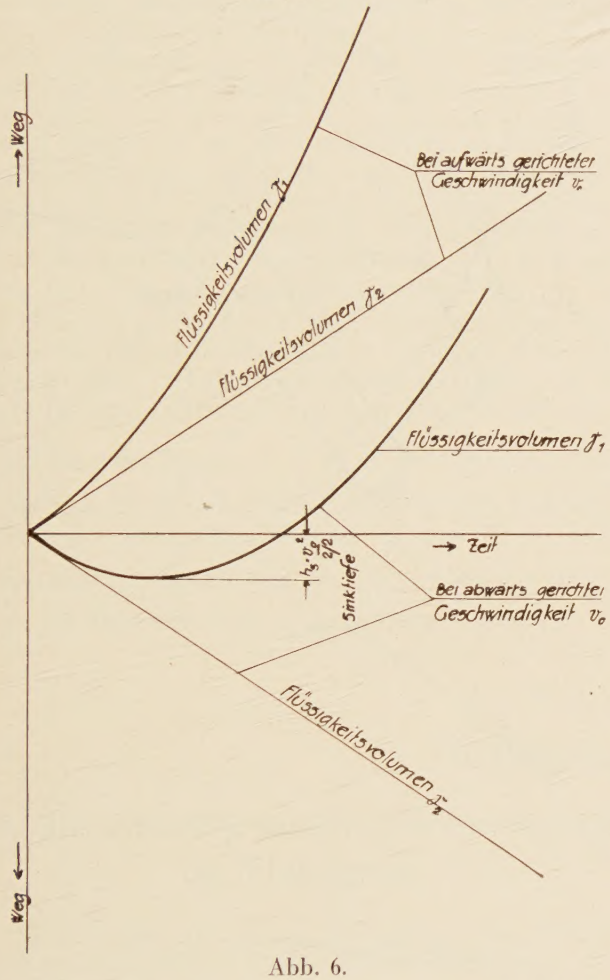



Abb. 6.

Die Geschwindigkeit erzeugt beim Mischen der Rührer. Die Richtung dieser Geschwindigkeit ist durch die Pfeile der Abb. 1—3 angedeutet. Hiervon ist der horizontal gerichtete Teil für die Mischwirkung ungünstiger als der vertikal gerichtete; denn beispielsweise für eine Strömung nach Abb. 2 legen die tiefsten Teilchen der Flüssigkeit leichteren spezifischen Gewichts am Behälterboden die parabolische Wegkurve Abb. 5 zurück. Ein beträchtlicher Teil des Behälterinhaltes wird also von diesen Teilchen gar nicht bestrichen. Je kleiner der Parameter der Wegkurve ist, d. h. je geringer die Geschwindigkeit $v_0$ ist, desto größer ist der an der Mischung unbeteiligte Teil des Behälterinhaltes.

In dem Gebiete vertikal gerichteter Geschwindigkeit strömen bei Aufwärtsrichtung die Teile geringeren spezifischen Gewichts auf Grund ihrer Auftriebsbeschleunigung rascher als die übrige Flüssigkeit, bleiben hierbei aber über den durchflossenen Querschnitt verteilt. Bei der folgenden Abwärtsrichtung werden die Teile geringeren spezifischen Gewichtes um das gleiche Maß verzögert. Hier wird also die für die Mischung wenn auch nur in geringerem Maße nachteilige Wirkung der Auftriebsbeschleunigung durch die Abtriebsverzögerung wieder aufgehoben. Zu beachten ist lediglich bei abwärts gerichteter Geschwindigkeit, daß, wie von den entsprechenden Verhältnissen beim Wurf bekannt ist, die Sinktiefe $h_s < \frac{v_0^2}{2p}$ sein muß, da für $h_s \geq \frac{v_0^2}{2p}$ die Geschwindigkeit der leichteren Flüssigkeit $= 0$ bezw. entgegengesetzt gerichtet wird.

Die bisherigen Überlegungen vernachlässigten die Flüssigkeitsreibung, deren Einfluß jedoch zweifellos so wesentlich ist, daß sie nicht außer Acht gelassen werden kann; und zwar handelt es sich hier um die innere Reibung, die der Auftriebsbewegung der leichteren Flüssigkeit entgegen wirkt. Es sei hierfür der Wert angewandt, den Oseen als Größe des Widerstandes einer Flüssigkeit gegen eine bewegte Kugel angibt *)

$$W = 6 \mu \pi v r_0 \left(1 + \frac{3}{8} \frac{\varrho r_0 v}{\mu}\right) \qquad 4)$$

Hierbei bedeutet $\mu$ = Zähigkeit der Flüssigkeit
$v$ = Geschwindigkeit der bewegten Kugel
$r$ = Radius der bewegten Kugel
$\varrho = \frac{\gamma}{g}$ = Dichte der Flüssigkeit

Für den Fall der Mischung sei angenommen, daß ein Tropfen der Flüssigkeit leichteren spezifischen Gewichts bei seiner Aufwärtsbewegung auf Grund der Auftriebskraft die bewegte Kugel darstelle, so daß die Werte der Flüssigkeit in Gleichung 4) sich auf die Flüssigkeit schwereren spezifischen Gewichts beziehen.

Wenn auch klar ist, daß das zu betrachtende Flüssigkeitsvolumen auf seinem Wege durch das schwerere Medium nicht die Form einer Kugel beibehalten wird, so kann doch mit genügender Annäherung diese Gleichung für den vorliegenden Fall in Anwendung gebracht werden. Faßt man die für die Verwendung einer bestimmten Flüssigkeit konstanten Werte $\mu$ und $\varrho$ sowie die Größe $r_0$, die sich nach unserer Annahme ebenfalls auf dem zu betrachtenden parabolischen Wegstück nicht verändert, zu Konstanten $c_1$ und $c_2$ zusammen, so nimmt Gleichung 4) die Form an:

$$W = c_1 v + c_2 v^2$$

wobei $c_1 = 6 \mu \pi r_0$

und $c_2 = \frac{18}{8} \varrho \pi r_0^2$ ist.

Es besteht auch hier eine parabolische Abhängigkeit von W und v. Ferner ist die Beziehung vorhanden:

*) Kaufmann, Angewandte Hydromechanik Bd. 1 S. 207 Berlin, Verl. Springer 1931.

$$A - W = m\,p,$$

wenn $A = V\,(\gamma_2 - \gamma_1)$ = Auftriebskraft
und $m$ = Masse. Also ist eine gradlinige Abhängigkeit von p und W vorhanden. Hierbei ist $\frac{1}{m}$ = dem Tangens des Neigungswinkels, und $\frac{A}{m}$ der Abschnitt, den die Gerade auf der p-Achse liefert. Beide Beziehungen — v und p in Abhängigkeit von W — sind in Abb. 7 dargestellt. $p = 0$ ergibt den Wert $v = v_E$, der naturgemäß nur asymptotisch erreicht werden kann, was sich aus der Beziehung $v = pt$ auch ermitteln läßt, deren Verlauf gleichfalls in Abb. 7 auf Grund der zusammengehörigen Werte von p und v eingetragen ist. Die Darstellung gestattet auch durch Loten der entsprechenden Werte von v und p die Abhängigkeit von t und p zu zeichnen. Die Beschleunigung p ist also unter dem Einfluß des Flüssigkeitswiderstandes nicht mehr constant, wie das vorher bei Vernachlässigung dieser Größe eingesetzt wurde, sondern sie ändert sich in Abhängigkeit der Zeit von dem Wert $p = \frac{(\gamma_2 - \gamma_1)g}{\gamma_1}$ bis $p = 0$, was allerdings erst bei $t = \infty$ zu erreichen ist. Die Gleichung 3a) heißt dementsprechend jetzt

$$x^2 = z\,\frac{2\,v_0^{\,2}}{\frac{1}{t}\int_{t=0}^{t=t_1} p\,dt} \qquad 5)$$

Stellt man weiter den Weg z als f (t) auf Grund der Beziehung $z = \int v\,dt$ dar (Abb. 7), was leicht graphisch durchgeführt werden kann *), so ist es nach Annahme von z möglich, die Grenzen des $\int_{t=0}^{t=t_1} p\,dt$ zu bestimmen und damit das Integral auszuwerten, das nun mit p′ bezeichnet sei.

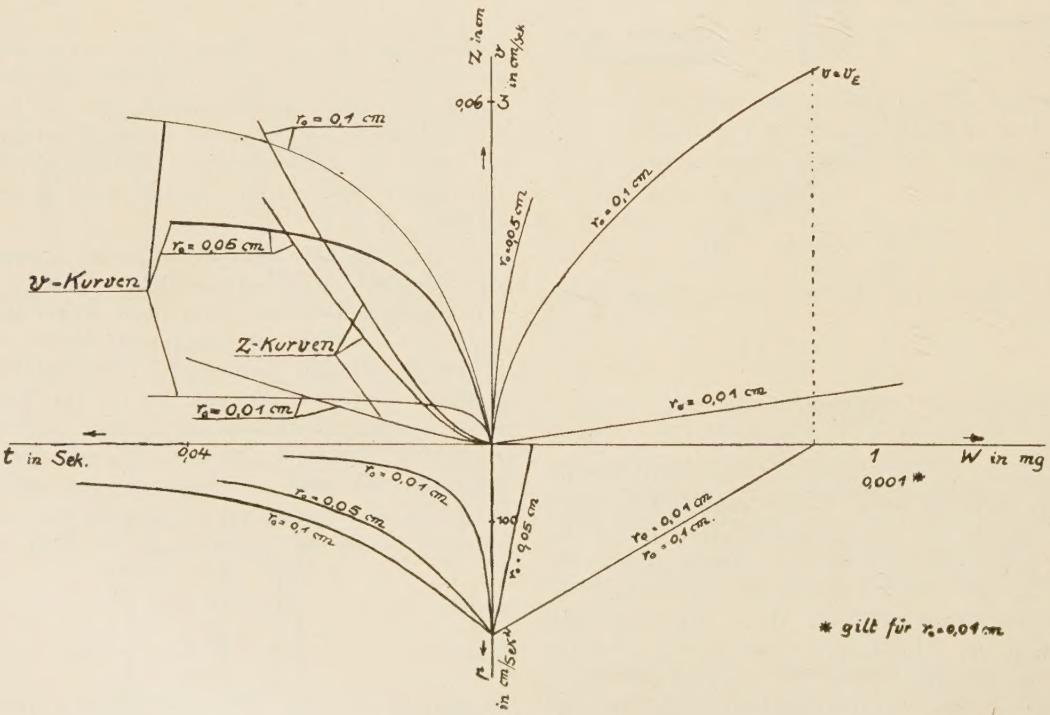



Abb. 7.

Dieser Wert p′ ist also abhängig von der Zähigkeit und dem Unterschied der spez. Gew. der Flüssigkeiten, ferner von der Annahme der zulässigen Größe

*) Vergl. Hütte 25. Auflage Seite 234.

von z und schließlich von der Teilchengröße der leichteren Flüssigkeit. Gerade diese letztgenannte Tatsache ist besonders bedeutsam. Eine kritische Betrachtung der Abb. 7 zeigt nämlich, daß bei sonst gleichbleibenden Voraussetzungen p′ um so kleiner wird, je geringer der Wert $r_0$ also die Teilchengröße ist. Außerdem ist aber zu erkennen, daß abnehmendes z eine Zunahme von p′ zur Folge hat. Es ergibt sich also für gleiche Zähigkeits- und spez. Gewichtsverhältnisse eine Abhängigkeit von $r_0$, p′ und z, wie sie in Abb. 8 in einem räumlichen Koordinatensystem dargestellt ist.

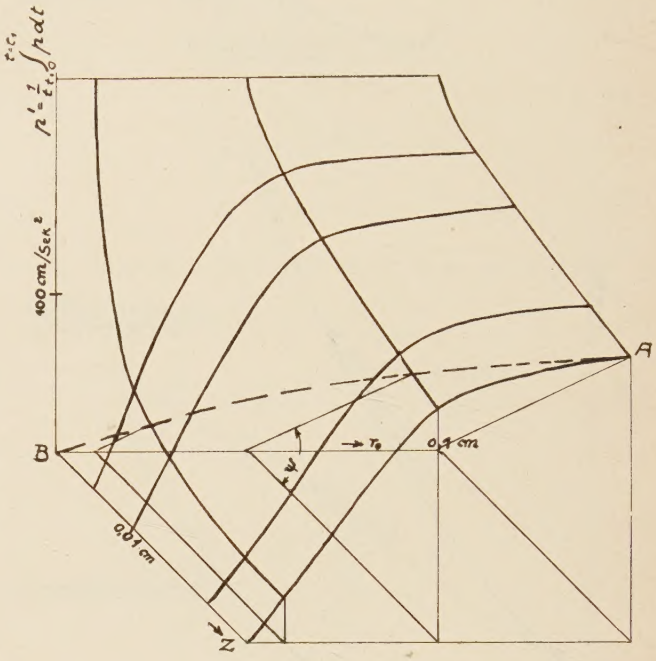



Abb. 8.

Nach Gleichung 5) ist $\frac{p'}{z} = \frac{2\,v_0^{\,2}}{x^2}$. Für $\frac{v_0}{x}$ = const. liegen die entsprechenden Werte von p′ und z auf

der Schnittkurve der unter tg. $\psi = \frac{2 v_0^2}{\chi}$ zur z-Achse geneigten Ebene mit der p′ $r_0$ z-Fläche. Die Linie A B stellt eine solche Schnittkurve dar.

Wendet man nun die hier entwickelten Zusammenhänge auf die Mischbewegung in einem Behälter an, so ergibt sich folgendes Bild: In Gleichung 5) stellt x den radialen Weg eines Flüssigkeitsteilchens V vom spez. Gew. $\gamma_1$ und z seine vertikale Ablenkung auf dieser Wegstrecke (Abb. 5) unter der Wirkung einer vertikal gerichteten Geschwindigkeit und der Auftriebskraft dar. p ist außer von z auch von $r_0$ abhängig. Bei Beginn des Mischvorganges wird $r_0$, das ja ein Maß der Teilchengröße darstellt, verhältnismäßig groß sein. Für das z hierzu gilt die Forderung, daß die Teilchen in einem möglichst steilen Winkel gegen die Behälterwand geschleudert werden, damit bei diesem Vorgang eine gute Zerteilung der einzelnen Flüssigkeitströpfchen erfolgt. Aus der Linie A B geht hervor, daß der Vorgang sich dann selbst allmählich günstiger gestaltet, denn je kleiner die Teilchengröße desto geringer wird auch z. Der Punkt B wird freilich nur asymptotisch erreicht, da der Verminderung der Teilchengröße praktische Grenzen gesetzt sind. Auf Grund dieser Ermittelungen wird man auch den Rührer zweckmäßig so gestalten, daß er neben der Erzeugung der Geschwindigkeit $v_0$ auch an der Zerteilung der Flüssigkeit mitwirkt.

Für die auf Seite 3 erwähnte Sinktiefe gelten bei Berücksichtigung der Flüssigkeitsreibung naturgemäß die gleichen Verhältnisse bezüglich der Größe von p wie für den Auftrieb entwickelt wurden, so daß auch hier für p der Wert $p' = \frac{1}{t} \int_{t=0}^{t=t_1} p \, dt$ einzusetzen ist. Die Tiefe, bis zu der ein Teilchen des leichteren Mediums durch die Mischgeschwindigkeit $v_0$ gesenkt werden soll, muß also kleiner sein als $\frac{v_0^2}{2p'}$, wobei die Grenzen des Integrals durch $h_s$ zu bestimmen sind.

Da p′ von der Teilchengröße abhängig ist, wird unter sonst gleichen Bedingungen der kleine Tropfen der Flüssigkeit geringeren spezifischen Gewichts bei abwärts gerichteter Bewegung tiefer sinken als der große. Das geht besonders deutlich aus dem Lichtbild Abb. 9 hervor. Mit einer Versuchsapparatur, die in Abschn. 4 Abb. 49 bezw. 68 näher erläutert ist, wurden 5000 ccm Wasser und 300 ccm Öl ($\gamma_1 = 0{,}814$) durch eine Bewegung gemäß Abb. 3 gemischt. Bezüglich der Anordnung der Aufnahme wird auf die entsprechende Erläuterung bei Abb. 16 und 17 hingewiesen. Bei 450 Umdr./Min. ergab sich das Bild Abb. 9, bei dem die großen Öltropfen noch kaum bis zur Hälfte der Flüssigkeitstiefe durch die abwärts gerichtete Bewegung außerhalb herabgezogen werden, während die kleinen Tropfen bereits so weit sinken, daß sie die untere Öffnung des Verdrängers erreichen.

Abb. 9.

Achsialrührer aufwärts wirkend, $\beta_1 = 30^0$, $n = 450$
Inh. 5000 cm³ Wasser u. 300 cm³ Öl.

2. Abschnitt.

# Rotationsbewegung.

## A. Gleichförmige Winkelgeschwindigkeit der Flüssigkeit.

Zur Erzeugung der in Abschnitt 1 behandelten Mischgeschwindigkeit werden Rührer verwendet, deren Form je nach den in Fig. 1 bis 3 angegebenen Strömungsbildern verschieden ist. In allen Fällen aber sind es Vorrichtungen, die um eine in der Mittellinie des Gefäßes liegende Achse in der Flüssigkeit rotieren, und deshalb ist stets, wenn auch bei den einzelnen Formen verschieden stark ausgeprägt, eine durch die Rotation hervorgerufene Drehbewegung der Flüssigkeit vorhanden. Es sei darum zunächst der Einfluß der Drehbewegung der Flüssigkeit auf die Mischung zweier Medien behandelt.

Rotiert ein oben offenes mit Flüssigkeit gefülltes Gefäß um seine vertikale Achse, so wirkt auf jedes darin befindliche Teilchen neben dem Gewicht dG die Zentrifugalkraft dZ. Auf der Resultierenden beider steht die Niveaufläche senkrecht. Für einen Punkt der Oberfläche gilt infolgedessen (Abb. 10)

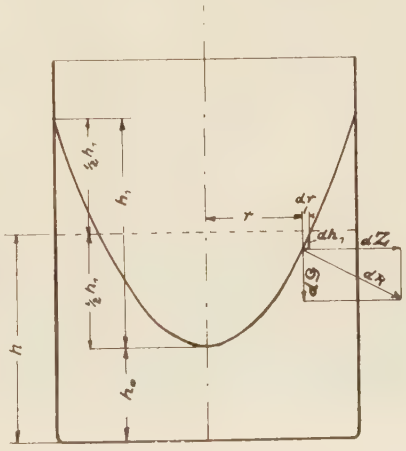



Abb. 10.

$$\frac{dh_1}{dr} = \frac{dZ}{dG}$$

und da $dG = g\ dm$

und $dZ = r\omega^2\ dm$

ist $$dh_1 = \frac{\omega^2}{g}\ r\ dr.$$

Durch Integration folgt hieraus

$$h_1 = \frac{\omega^2 r^2}{2g} \qquad 6)$$

Diese Gleichung stellt eine Parabel dar, deren Scheitel bei $r = 0$ also in der Rotationsachse liegt. Die Spiegelfläche ist das zugehörige Umdrehungsparaboloid und $h_1$ stellt die Höhe dieses Paraboloids dar. Wird die Höhe der ruhenden Flüssigkeit in dem Gefäß mit h bezeichnet und der Abstand des Paraboloidscheitels vom Boden des Gefäßes mit $h_0$, so liefert die Tatsache, daß das Volumen bei der Drehbewegung das Gleiche bleibt wie in der Ruhe, die Gleichung

$$r^2 \pi h = r^2 \pi h_0 + \frac{1}{2} r^2 \pi h_1$$

also $$h = h_0 + \frac{1}{2} h_1.$$

Der Flüssigkeitsspiegel der Ruhe liegt demnach auf der Mitte der Höhe des Rotationsparaboloids.

Ein Versuch mit einem zylindrischen Glasgefäß 125 mm lichte Weite 205 mm Höhe mit einer Füllung von 1,5 Liter Wasser, das um seine vertikale Achse rotierte, bestätigte diese rechnerische Ermittelung. Die Lichtbildaufnahme Abb. 11 zeigt die Absenkungskurve bei 229 Umdr./Min., die ausgemessen die rechnerisch ermittelte Parabel Abb. 11a ergab.

Die Eigenschaften der Flüssigkeit, ihre Zähigkeit und ihr spez. Gewicht sind für die Absenkungsfläche

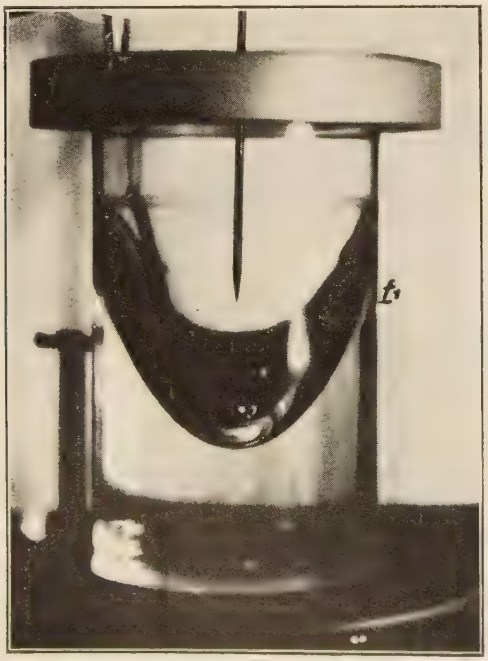



Abb. 11.

Absenkungsfläche n = 229
Inh. 1,5 lit. Wasser.

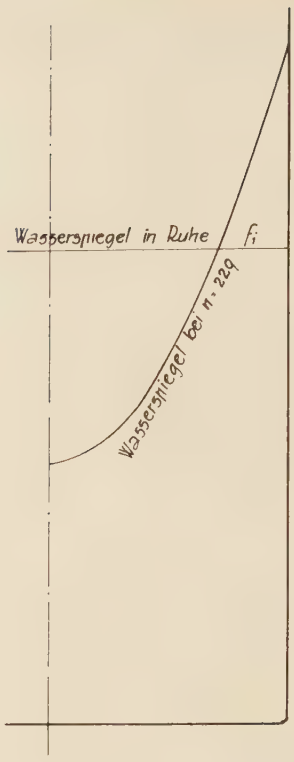



Abb. 11a.

bei der Drehbewegung ohne Bedeutung, denn Gleichung 6) stellt lediglich eine Beziehung zwischen Parabelhöhe und der Umfangsgeschwindigkeit dar. Führt man also den vorerwähnten Versuch statt mit Wasser mit einer anderen Flüssigkeit durch, so ist die erreichte Absenkungsfläche stets dieselbe. Eine größere Zähigkeit bewirkt lediglich, daß eine längere Zeit bis zur endgültigen Ausbildung der Fläche benötigt wird.

Zwei Flüssigkeiten mit verschiedenem spez. Gewicht haben also als Oberfläche bei gleichmäßiger Winkelgeschwindigkeit ebenfalls ein Paraboloid. Die Druckzunahme verläuft ebenso wie im Falle der Ruhe in jedem Punkte für jede der Flüssigkeiten senkrecht linear nach dem Gesetz $P = \gamma h$. Die Trennungsfläche dieser Flüssigkeit bei der Drehbewegung mit gleichmäßiger Winkelgeschwindigkeit ist demnach ebenfalls ein Rotationsparaboloid und zwar in dem gleichen senkrechten Abstand, den die beiden Flüssigkeitsoberflächen in der Ruhe hatten. Durch einen Versuch mit 1 Liter Wasser und 0,5 Liter Öl in dem gleichen Gefäß wie Abb. 11 wird diese Überlegung bestätigt. Abb. 12 stellt die Absenkungsflächen bei 229 Umdr./Min. dar. Die genaue Lage des oberen Flüssigkeitsspiegels ist aus der Aufnahme selbst nicht zu entnehmen, da das davorliegende Paraboloid der Begrenzungsfläche der beiden Flüssigkeiten eine erhebliche Verzerrung des Bildes hervorruft. Die Absenkung dieses Spiegels wurde darum durch Abtasten einzelner Punkte mit einer Nadel ausgemessen. Die Bestimmung der Grenzfläche beider Flüssigkeiten ist jedoch aus der Aufnahme entnommen, indem eine in der Flüssigkeit photographierte Meßskala mit dem Bild 12 zusammenkopiert und hieraus die Absenkungskurve in wahrer Größe ermittelt wurde. Bei Berücksichtigung der geringen durch die Zentralprojektion bedingten Abweichung ergibt sich hier für die Begrenzungsfläche ebenso wie für die ausgemessene Spiegelfläche das auf Grund der Gleichung 6) errechnete Rotationsparaboloid. Die Flüssigkeitsspiegel in Ruhe sind am Ran-

de des Glasgefäßes mit $f_1$ und $f_2$ markiert (Abb. 12) und dienten zur Festlegung der Lage der beiden Kurven zueinander, die in Abb. 12a dargestellt sind.

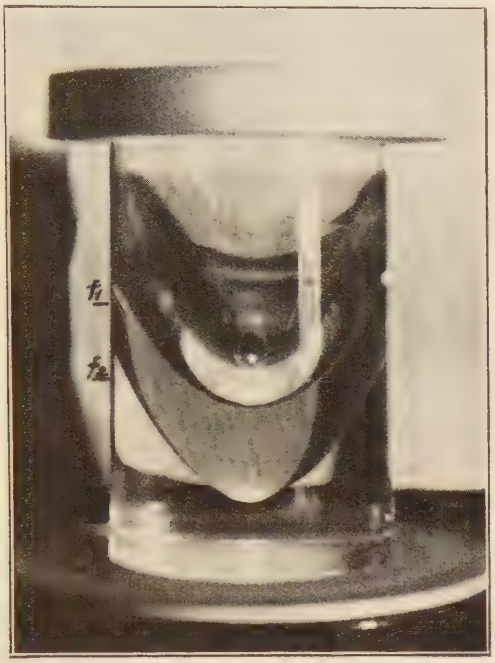



Abb. 12.

Absenkungsfläche n = 229
Inh. 1 lit. Wasser u. 0,5 lit. Öl.

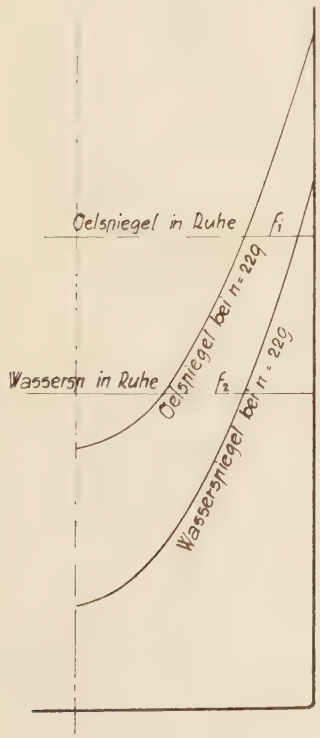



Abb. 12a.

Daß größere Zähigkeit einer Flüssigkeit, wie vorhin erwähnt wurde, die Zeit zur Erreichung eines Beharrungszustandes in der Drehbewegung verzögert, geht aus der Aufnahme Abb. 13 hervor, die die Lage beider Flüssigkeitsspiegel nach 1 Minute Anfahrzeit darstellt. Wenn auch ein Ausmessen des oberen Spiegels hier nicht möglich war, da es sich um einen vorübergehenden Zustand handelt, so zeigt doch bereits ein flüchtiger Vergleich, daß die Oberfläche des Wassers schon sehr tief abgesunken ist, während das Paraboloid des Öles erst im Entstehen begriffen ist. Die Winkelgeschwindigkeit hat sich hier dem Inhalt noch nicht bis zur Mitte voll mitgeteilt, weshalb der mittlere Teil der Oberfläche noch stark abgeplattet ist. Da infolgedessen auf der Wasseroberfläche kein gleichmäßiger, sondern vielmehr ein nach der Mitte zu etwas zunehmender Druck herrscht, ist auch, wie die Ermittelung ergibt, die Wasseroberfläche in der Mitte sogar gegenüber ihrer endgültigen Lage etwas abgesenkt. In Abb. 13a ist die Lage dieser Kurve angegeben.

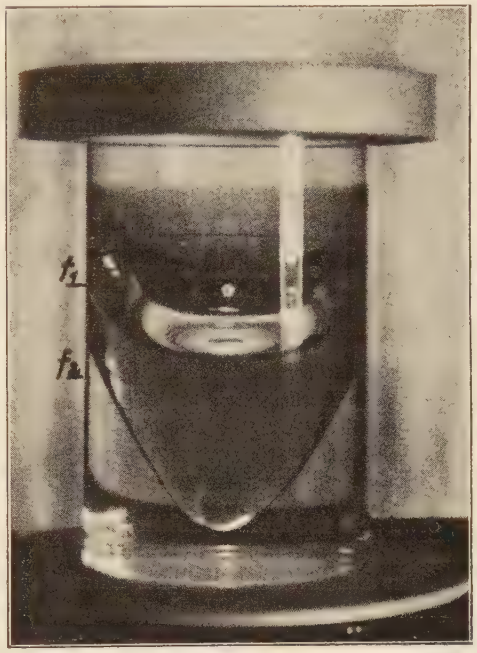



Abb. 13.

Absenkungsfläche nach 1 Min.
Anfahrzeit. Inh. 1 lit. Wasser u. 0,5 lit. Öl.

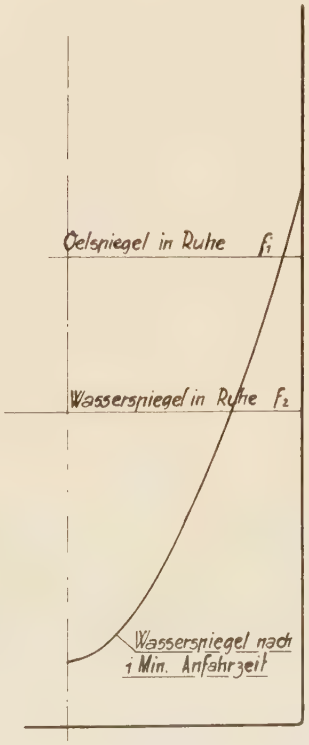



Abb. 13a.

## B. Ungleichförmige Winkelgeschwindigkeit der Flüssigkeit.

In den bisher in Abschnitt 2 behandelten Fällen hatte sich die Winkelgeschwindigkeit des Gefäßes vollkommen auf den Inhalt übertragen. Betrachtet man diesen Vorgang vom Standpunkt des Rührproblems, so wäre ein gleicher Zustand durch Rühren nur zu erreichen, wenn in dem jetzt ruhend angenommenen Gefäß ein den ganzen Querschnitt ausfüllendes Rührblech die Flüssigkeit in Rotation versetzt.

Wird dagegen, wie es praktisch stets der Fall ist, ein Rührer gewählt, dessen Durchmesser kleiner als der des Rührbehälters ist, so liegt bei Drehung des Rührers infolge der Zähigkeit der Flüssigkeit keine gleichmäßige Winkelgeschwindigkeit der Flüssigkeit mehr vor, sondern im Bereiche des Rührers ist die Drehbewegung stärker als am äußeren Radius. Die entstehende Absenkungsfläche ist also jetzt lediglich in dem inneren Teil ein Paraboloid, während im äußeren Gebiet die Winkelgeschwindigkeit nach dem Satz vom Drall $r\, c_u = \text{const.}$ d. h. hyperbolisch abnimmt. Es muß sich also ein Bild ergeben, wie es Abb. 14 mit Strom- und Normallinien darstellt (Rankines Doppelwirbel) *), wobei der Verlauf von $\omega$ und $c_u$ als Funktion von r die Form Abb. 15 hat. Tatsächlich ist dieses Bild nicht zu erreichen, da gleichzeitig eine Flüssigkeitsförderung von dem Rührer ausgeübt wird, und diese Strömung ebenfalls die Lage des Flüssigkeitsspiegels beeinflußt, so daß also in Wirklichkeit eine Absenkung etwa wie in Abb. 14 punktiert angedeutet eintritt. Einen solchen Zustand zeigt Abb. 16 für Wasser, das mit einem Rührblech von 49 mm Durchmesser und 40 mm Breite bei n = 650 Umdr./Min. gerührt wird.

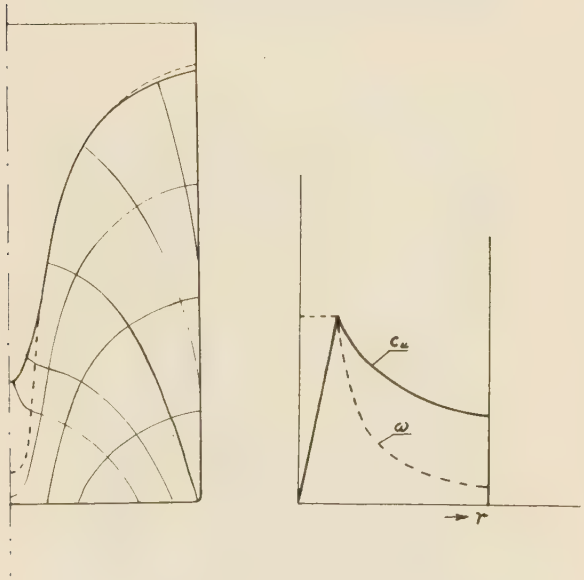



Abb. 14. 15.

Diese wie alle weiteren Lichtbildaufnahmen wurden an der in Abschnitt 4 Abb. 49 näher erläuterten Versuchsapparatur vorgenommen und zwar derart, daß der Rührbehälter selbst in einem mit Wasser gefüllten viereckigen Gefäß mit Seitenwänden aus Glas aufgestellt, und die Aufnahme durch dieses Gefäß hindurch gemacht wurde. (Abb. 17). Hierdurch ist erreicht, daß auch die seitlichen Teile des Rührbehälters, die sonst infolge der starken Lichtbrechung an der gekrümmten Außenwand unsichtbar bleiben, dargestellt werden konnten. Die noch infolge der Zentralprojektion und der geringen Parallelverschiebungen beim Durchtritt der Strahlen durch das Glas bedingte Verzerrung ist so gering, daß sie für das Bild belanglos ist.

*) Vergl. Lamb, Hydrodynamik Seite 33. Verlag B. C. Teubner. Leipzig und Berlin 1907.

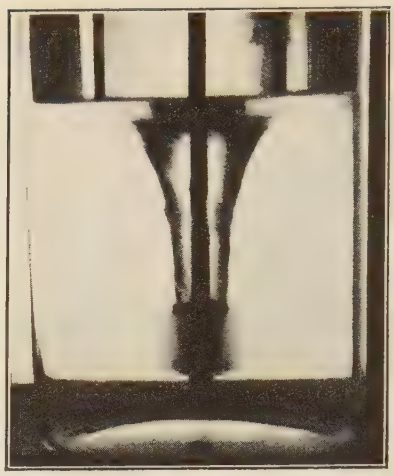


Abb. 16.
Rührblech 49 mm ∅ 40 mm breit
n = 650 Inh. 5 lit. Wasser.

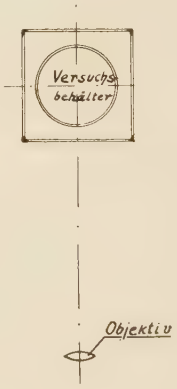



Abb. 17.

Für zwei Flüssigkeiten verschiedenen spez. Gew. muß auch bei ungleichförmiger Winkelgeschwindigkeit die Trennfläche die gleiche Form wie die Niveaufläche aufweisen und lediglich um den vertikalen Abstand, den die Flächen in Ruhe hatten, verschoben sein. Abb. 18 liefert ein entsprechendes Bild für 5000 ccm Wasser und 70 ccm Öl bei n = 350 Umdr./Min. und sonst gleichen Bedingungen wie Abb. 16. Auch hier macht sich die Mischbewegung des Rührers geltend, denn infolge der Saugwirkung ist die Ölmenge vollkommen nach der Mitte gezogen. In allen Fällen also, in denen beim Anfahren eine Abwärtsbewegung der leichteren Flüssigkeit an der Rührerachse zu erzeugen ist, wirkt eine Rotation der Masse überaus fördernd. Man wird aber bemüht sein, dieses Gebiet der Rotation so klein wie möglich zu halten; denn im übrigen hat das Rotieren nicht nur keinen Einfluß auf die Mischung, sondern es erzeugt außerdem eine Zentrifugalkraft $Z = V r \omega^2 \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{g}$, die ebenso wie die Auftriebskraft nur in verstärktem Maße gerade das Gegenteil, nämlich Trennung der beiden Flüssigkeiten, bewirkt.

Abb. 18.

Rührblech 49 mm ∅ 40 mm breit
n = 350. Inh. 5000 cm³ Wasser u. 70 cm³ Öl.

## C. Einfluss der Rotationsbewegung auf die Mischbewegung.

Da die in Abschnitt 1 behandelte Mischbewegung und die Rotationsbewegung sich bei dem Vorgang des Rührens überlagern, muß die Zentrifugalkraft Z bei der Ermittelung der Wegkurve in Gleichung 1) und 2) mit in Betracht gezogen werden. Die Beschleunigung auf Grund dieser Kraft ist $p_z = \frac{(\gamma_2 - \gamma_1) r \omega^2}{\gamma_1}$, so daß also die Beziehung besteht

$$\frac{p_z}{p} = \frac{r \omega^2}{g}. \qquad 7)$$

Nach Abb. 19 ist dann

$$\frac{dx}{dt} = v_0 \cos \varepsilon - p_z t$$

$$x = v_0 \cos \varepsilon t - \frac{1}{2} p_z t^2$$

$$\frac{dz}{dt} = -v_0 \sin \varepsilon + p t$$

$$z = v_0 \sin \varepsilon + \frac{1}{2} p t^2.$$

Für $\varepsilon = 0^0$ ist demnach $x = v_0 \sqrt{\frac{2z}{p}} - z \frac{r \omega^2}{g}$.

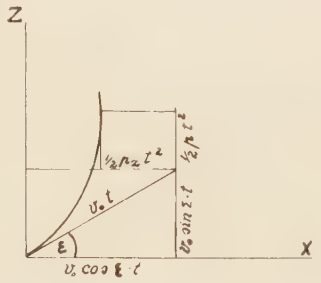


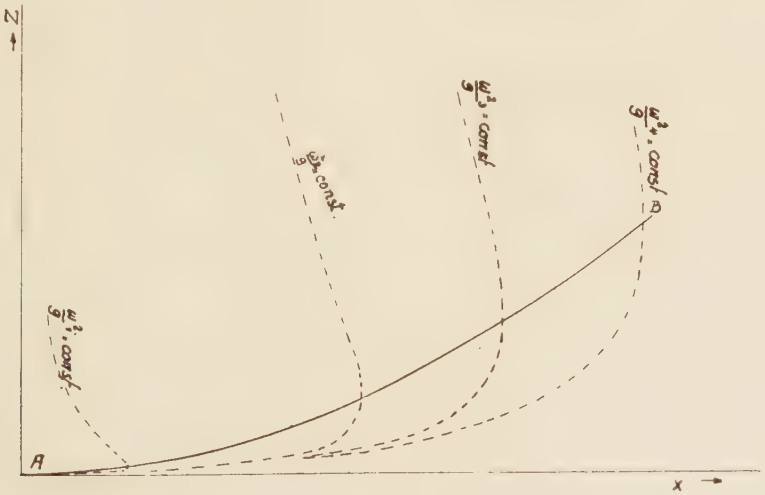

Abb. 19.

Betrachtet man die Mittellinie des Rührers als Z-Achse, so wird r = x und die Gleichung nimmt die Form an:

$$x^2 = \frac{2 v_0^2 z}{p' (1 + z \frac{\omega^2}{g})^2}, \qquad 8)$$

wobei unter Berücksichtigung des Flüssigkeitswiderstandes für p wiederum entsprechend den Erörterungen in Abschn. 1 $p' = \frac{1}{t} \int_{t=0}^{t=t_1} p \, dt$ gesetzt ist. Die Wegkurve liegt also, wie ein Vergleich mit Gleichung 5) zeigt, steiler als ohne Einwirkung der Zentrifugalkraft d. h. für gleiche Werte von x, z und p′ muß bei der Rotation der Flüssigkeit mit einer größeren Mischgeschwindigkeit $v_0$ gearbeitet werden, als es bei fehlender Drehung des Behälterinhaltes erforderlich ist.

Für einen bestimmten Wert von $\frac{2 v_0^2}{p'}$ haben die Wegkurven für verschiedene Werte $\frac{\omega^2}{g}$ = const. die in Abb. 20 dargestellte Form.




– – – –Radiale Wegkurven eines Flüssigkeitsteilchens vom spez. Gew. $\gamma_1$ in einer Flüssigkeit vom spez. Gew. $\gamma_2$ unter dem Einfluß einer horizontal [in Richtung der x-Achse] gerichteten Geschwindigkeit $v_0$ und einer Rotationsbewegung der gesamten Flüssigkeitsmenge um die Z-Achse bei verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten $\omega_1$, $\omega_2$, $\omega_3$, $\omega_4$, wobei $\omega_1 > \omega_2 > \omega_3 > \omega_4$

Abb. 20.

Die erste Ableitung der Gleichung 8) liefert

$$x' = v_0 \sqrt{\frac{2}{p'}} \left( \frac{1}{2} z^{-\frac{1}{2}} - \frac{\omega^2}{2g} z^{\frac{1}{2}} \right).$$

Das Maximum liegt also, da $v_0 \sqrt{\frac{2}{p'}}$ nicht gleich 0 sein kann, bei $z = \frac{g}{\omega^2}$. Für dieses Maximum ist

$$x^2 = \frac{v_0^2 g}{2 p' \omega^2}. \qquad 9)$$

Die Kurve A B Abb. 20 stellt die Verbindung der maximalen Werte dar. Ihre Gleichung lautet $x^2 = \frac{v_0^2 z}{2 p'}$. Es ist also eine Parabel wie die Wegkurve nach Gleichung 5) jedoch mit einem Parameter von nur $\frac{1}{4}$ der Größe.

Da der Verlauf von $\omega$, wie aus Abb. 15 hervorgeht, bis zum maximalen $c_u$ Punkt constant ist, so folgt, daß ein Teilchen V vom spez. Gewicht $\gamma_1$ nur dann sich nach außen bewegen kann, wenn es im Bereiche $\omega$ = const. unterhalb der A B Kurve bleibt, z also $< \frac{g}{\omega^2}$ ist; damit ist dann zwangläufig verbunden, daß auch der weitere Weg unterhalb der A B Kurve verläuft.

Für die senkrechte Bewegung, also senkrecht gerichtete Geschwindigkeit $v_0$ gelten entsprechend den Gleichungen für die horizontale Bewegung die Beziehungen

$$x = \frac{1}{2} p_z t^2$$

$$z = \pm v_0 t + \frac{1}{2} p t^2.$$

Unter der Annahme, daß für $x = 0$ $r = r_B$ ist, wobei 2r den Durchmesser des Rührbehälters bezeichnet, ergibt sich also

$$z = \pm v_0 \sqrt{\frac{2 x g}{p' (r_B - x) \omega^2} + \frac{x g}{(r_B - x) \omega^2}}$$

$$z = \pm \frac{v_0}{\omega} \sqrt{\frac{2 g}{p'}} \sqrt{\frac{x}{r_B - x}} + \frac{g}{\omega^2} \frac{x}{(r_B - x)} \qquad 10)$$

Die Kurve hat für constante Werte von $v_0$ und $\omega$ einen Verlauf nach Abb. 21. Die Differentiation der Gleichung 10) ergibt

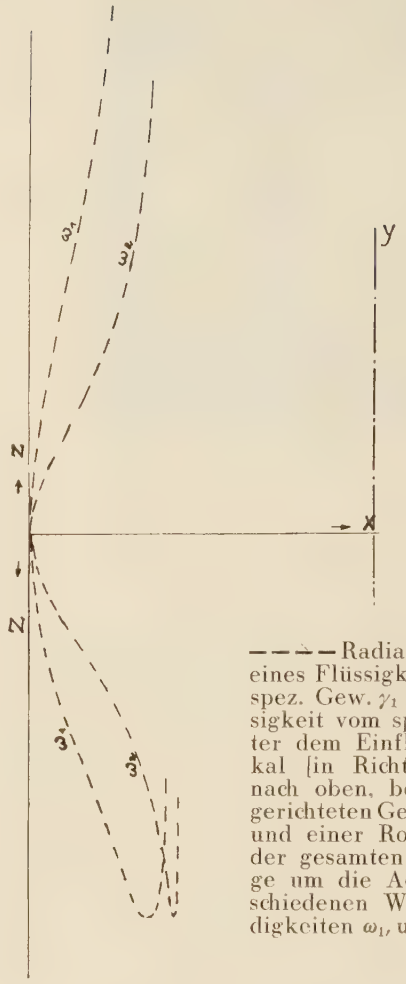
$$\frac{dz}{dx} = \left[ \pm \frac{v_0}{\omega} \sqrt{\frac{2g}{p'}} \frac{1}{2} \left( \frac{x}{r_B - x} \right)^{-\frac{1}{2}} + \frac{g}{\omega^2} \right] \frac{r_B}{r_B - x}$$

Bei abwärts gerichteter Geschwindigkeit $v_0$, also negativem Vorzeichen des ersten Gliedes, ist demnach ein Minimum vorhanden für

$$x = \frac{r_B \omega^2 v_0^2}{2 g p' + \omega^2 v^2}$$

Hierfür wird $-z = \frac{v_0^2}{2 p'}$, was ja die bereits in Abschnitt 1 erwähnte Sinktiefe darstellt.

Die vertikale Bahn eines Teilchens V $\gamma_1$, die ohne Rotation lotrecht erfolgte, besitzt also jetzt eine Ablenkung radial nach innen. Auch dieser Teil der Bewegung erfordert deshalb bei Drehbewegung der Masse unter sonst gleichen Voraussetzungen ein größeres $v_0$, wenn man annähernd die gleiche Wirkung wie ohne Rotation der Flüssigkeit erzielen, d. h. die Ablenkung möglichst gering halten will. Mit abnehmender Teilchengröße sinkt jedoch der Wert p' erheblich, und je geringer p' desto flacher verlaufen die Bahnen Abb. 20 und 21, d. h. bei hohem Mischungsgrad wird der Unterschied von $v_0$ mit und ohne Rotation geringer.




– – – – Radiale Wegkurven eines Flüssigkeitsteilchens vom spez. Gew. $\gamma_1$ in einer Flüssigkeit vom spez. Gew. $\gamma_2$ unter dem Einfluß einer vertikal [in Richtung d Z-Achse] nach oben, bezw. nach unten gerichteten Geschwindigkeit $v_0$ und einer Rotationsbewegung der gesamten Flüssigkeitsmenge um die Achse y bei verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten $\omega_1$ u. $\omega_2$ wobei $\omega_1 < \omega_2$

Abb. 21.

Die wirkliche Strömung wird die Bewegungsform nun nicht so geordnet verlaufen lassen, wie hier rechnerisch ermittelt wurde; vielmehr wird der Einfluß der Wandreibung und die mehrfache plötzliche Richtungsänderung der Geschwindigkeit Sekundärströmungen und Wirbel erzeugen, so daß die Teile des Behälters, die nach der Lage der errechneten Wegkurven nicht von der leichteren Flüssigkeit bestrichen werden, bis zum gewissen Grade an der Mischung teilnehmen. Das gilt sowohl für die Mischbewegung ohne, wie auch mit Rotation. Es ist darum nicht angängig, die Größe der Mischgeschwindigkeit $v_0$ allein auf Grund der hier entwickelten theoretischen Grundlagen zu beurteilen. Hierüber sollen vielmehr die in Abschn. 4 behandelten Versuche einen Anhaltspunkt geben. Als wesentlich sei hier zunächst lediglich Folgendes festgestellt: erhöhte Drehbewegung der Masse macht eine Steigerung der Mischgeschwindigkeit erforderlich; die Steigerung ist um so geringer, je kleiner die Teilchengröße d. h. je feiner die Durchmischung ist; wird im Bereiche $\omega$ = const. der Wert $z > \frac{g}{\omega^2}$, so ist eine Mischbewegung unmöglich.

# Erzeugen der Mischbewegung.

Da die Erzeugung der Mischbewegung eine Förderung von Flüssigkeit darstellt, ist es naheliegend, die Vorrichtungen hierfür vom Standpunkt der Rotationsflüssigkeitsförderer also der Kreiselpumpen zu betrachten. Nach den Strömungsbildern Abb. 1 bis 3 kommt demnach für eine Bewegung nach Abb. 1 als Vergleich eine Zentrifugalpumpe, für eine solche nach Abb. 2 und 3 eine Achsialpumpe in Frage. Doch geben bereits die Erörterungen von Abschnitt 1 und 2 Aufschluß darüber, daß hier teilweise erheblich andere Bedingungen vorliegen als im Pumpenbau üblich, die bei der Bemessung und Formgebung von ausschlaggebender Bedeutung sind. Die Aufgabe des Rührers liegt nämlich nicht allein darin, Flüssigkeit zu fördern, sondern auch sie zu zerteilen. Ferner soll angestrebt werden, die Rotation des Behälterinhaltes möglichst gering zu halten, und weiterhin ist auf die erforderliche Rückströmung der Flüssigkeit Rücksicht zu nehmen.

Für die Größe der Mischgeschwindigkeit $v_0$ sind die in Abschnitt 1 und 2 angestellten Ermittelungen Richtung gebend. Eine Beziehung dieser Geschwindigkeit zum Behälterinhalt ergibt sich aus der Bedingung, daß die gesamte Flüssigkeitsmenge mit — das sei zunächst einmal angenommen — möglichst gleichmäßiger Geschwindigkeit in dem Behälter die kreisende Mischbewegung ausführen soll. Ein Behälter normaler Form liefert demnach (Abb. 22) für eine Strömung nach Abb. 2 eine Querschnittsfläche $f = \frac{1}{2} \frac{\pi d^2}{4} \xi_1$, wobei d den Durchmesser des Behälters bezeichnet und $\xi_1$ einen Berichtigungsfaktor darstellt, der die durch die mittlere Absenkung und die Sekundärströmungen für die eigentliche Mischbewegung unwirksamen Teile berücksichtigt, also kleiner als 1 ist. Die Fördermenge Q ist demnach gegeben durch $\frac{\pi d^2}{8} \xi_1 v_0$. Für eine Strömung nach Abb. 23 ist sinngemäß $f = \frac{\pi d^2}{4} \xi_2$. Mit Rücksicht auf den stärkeren Absenkungskegel (hierauf wird später noch eingegangen) ist $\xi_2 < \xi_1$ zu wählen. Dementsprechend wird $Q = \frac{\pi d^2}{4} \xi_2 v_0$.

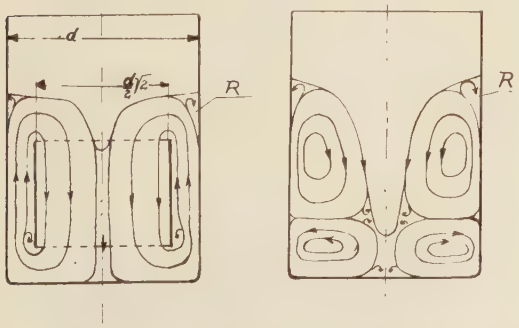



Abb. 22. Abb. 23.

Die Förderhöhe setzt sich zusammen aus dem Geschwindigkeitsverlust, der besonders durch die starken Richtungsänderungen und die Wandreibung bedingt ist, und einer Verlustgröße infolge des lebhaften turbulenten Flüssigkeitsaustausches zwischen den verschieden gerichteten Strömungen. Beide Werte müssen ein vielfaches der Geschwindigkeitshöhe $\frac{v_0^2}{2g}$ sein, so daß also gilt $H = \zeta \frac{v_0^2}{2g}$. Hierin ist für ähnliche Kanalformen der Beiwert $\zeta$ abhängig von der Reynoldschen Zahl. Der Kraftbedarf ergibt sich also zu

$$N = \frac{Q \cdot H \cdot \gamma}{\eta \cdot 75} = \frac{f \cdot v_0 \cdot \zeta \cdot v_0^2 \cdot \gamma}{\eta \cdot 75 \cdot 2g} \qquad 11)$$

Für die Zerteilung der Flüssigkeit ist die Erscheinung des Ein- und Austrittsstoßes, die sonst an den Laufrädern von Turbinen und Pumpen des ungünstigen Einflusses auf den hydraulischen Wirkungsgrad wegen nach Möglichkeit vermieden wird, überaus günstig. Maßnahmen, die in dieser Richtung wirken, — dazu gehört beispielsweise auch die Wahl einer geringen Schaufelzahl — werden also auf den Mischvorgang fördernd wirken.

Die weitere Forderung möglichst geringer Rotation der Flüssigkeit sowie die Rücksichtnahme auf die erforderliche Rückströmung sind Gebiete, die im Pumpenbau keine unmittelbare Parallele haben, aber von weittragender Bedeutung auf die Mischarbeit sind. Es soll darum der Einfluß einiger Rührerformen in dieser Hinsicht näher betrachtet werden.

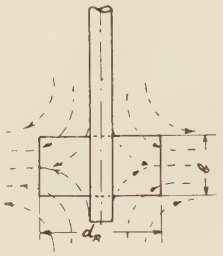


Abb. 24.

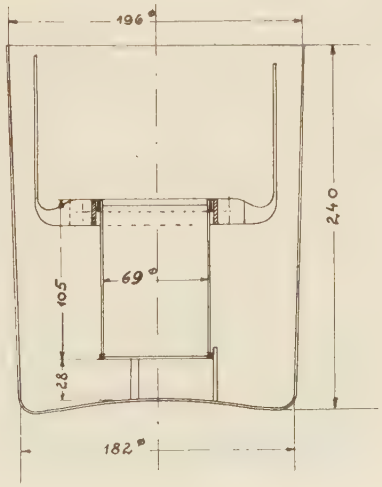



Abb. 25.

Als Beispiel eines Zentrifugalrührers sei ein einfaches vertikal gestelltes Rührblech behandelt, das als

einfachste Form eines doppelt wirkenden Schaufelrades hoher spezifischer Drehzahl (Abb. 24) angesehen werden kann, und nach Versuchen bei der I. G. Farbenindustrie A.G. Ludwigshafen a. Rh. auch für den Vorgang des Lösens von Salzen günstige Werte lieferte. Für den Achsialrührer kommt ein Kaplanrad mit Verdrängerrohr (vergl. Abb. 68) in Frage, wobei für die folgenden Lichtbildaufnahmen ein Verdränger aus Glas in der Anordnung Abb. 25 Verwendung fand. Zur Beurteilung des Einflusses dieser Rührerformen auf die Drehbewegung des Behälterinhaltes seien 6 Strömungsbilder mit je 5 Liter Wasser einander gegenübergestellt.

Mischbewegung nach Abb. 1

Abb. 16, Rührblech 49 mm ∅, 40 mm breit, 650 Umdr./Min.

Abb. 26, Rührblech 80 mm ∅, 40 mm breit, 400 Umdr./Min.

Mischbewegung nach Abb. 2

Abb. 27, Kaplanrad 66 mm ∅, Schaufelwinkel $\beta_1 = 15^0$, 700 Umdr./Min.

Abb. 28, Kaplanrad 66 mm ∅, Schaufelwinkel $\beta_1 = 30^0$, 700 Umdr./Min.

Abb. 26.
Rührblech. 80 mm ∅ 40 mm breit
n = 400, Inh. 5 lit. Wasser.

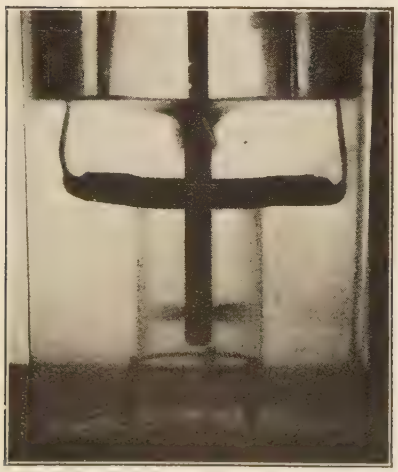


Abb. 27.
Achsialrührer abwärts wirkend
$\beta_1 = 15^0$, n = 700, Inh. 5 lit. Wasser.

Mischbewegung nach Abb. 3

Abb. 29, Kaplanrad 66 mm ∅, Schaufelwinkel $\beta_1 = 15^0$, 700 Umdr./Min.

Abb. 30, Kaplanrad 66 mm ∅, Schaufelwinkel $\beta_1 = 30^0$, 700 Umdr./Min.

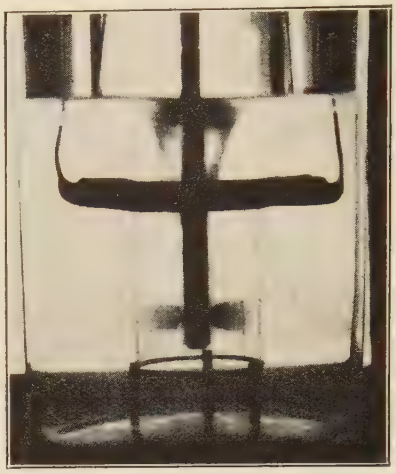


Abb. 28.
Achsialrührer abwärts wirkend
$\beta_1 = 30^0$, n = 700, Inh. 5 lit. Wasser.

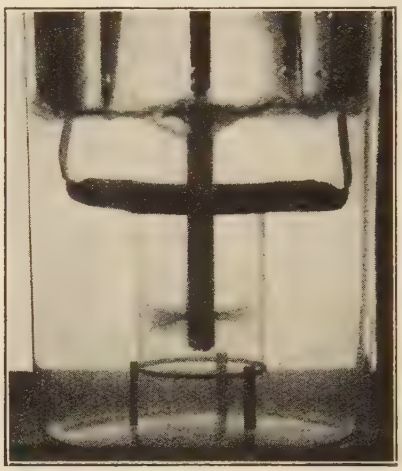


Abb. 29.
Achsialrührer aufwärts wirkend
$\beta_1 = 15^0$, n = 700, Inh. 5 lit. Wasser.

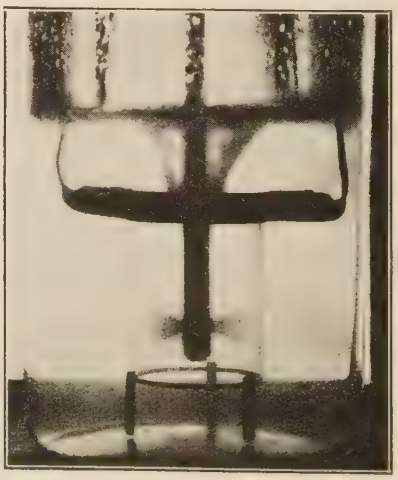


Abb. 30.

$\beta_1 = 30^0$, n = 700, Inh. 5 lit. Wasser.

Es tritt klar hervor, daß die Drehbewegung des Inhaltes in Abb. 16 und 26 bei weitem größer ist als bei dem Arbeiten mit dem Achsialrührer, und zwar steigt sie bei gleicher Umfangsgeschwindigkeit des Rührers erheblich mit größer werdendem Durchmesser. Der Achsialrührer weist ein höheres $c_u$ der Masse auf je größer $\beta_1$ wird. Außerdem ist festzustellen, daß beim aufwärts arbeitenden Kaplanrad die plötzliche Umlenkung der Strömungsrichtung an der Oberfläche eine erhebliche Wellenbildung hervorruft, die bei größerem Winkel $\beta_1$ sogar ein starkes Herumspritzen der Flüssigkeit zur Folge hat.

Der große Unterschied der Rotation des Behälterinhaltes bei der Verwendung von Zentrifugal- und Achsialrührer muß sich naturgemäß auch in der Bahn der Teilchen beim Mischvorgang äußern. Um hierüber Aufschluß zu erhalten und gleichzeitig die Flüssigkeitsbewegung in dem Versuchsbehälter näher zu beobachten, wurde dem Wasser etwas Aluminiumpulver zugefügt, wodurch die Strömungserscheinungen am Rande des Gefäßes sichtbar gemacht werden konnten. Mit einem Rührblech von 49 mm ∅ und 40 mm Breite ergaben sich auf diese Weise die Strömungsbilder Abb. 31 für 400 Umdr./Min., Abb. 32 für 600 Umdr./Min. und Abb. 33 für 800 Umdr./Min. In jedem Falle ist hier etwa in Höhe der Rührermitte eine Teilung der Strömung nach aufwärts und abwärts wahrzunehmen. Dort erreichen also die vom Rührer nach außen geschleuderten Teilchen die Behälterwand. Die anschließende Vertikalbewegung zeigt den Einfluß der Rotation; denn die Richtung ist bestimmt als Resultierende von $v_0$ und $c_u$. Je höher also die Drehzahl, desto flacher sind die Bahnen gegen die Horizontale geneigt. Die Abwärtsströmung setzt sich bis zum Behälterboden fort und geht dort wieder in die Horizontalbewegung über, da nun die Rückströmung zur Behältermitte einsetzt. Anders liegt der Fall bei der aufwärts gerichteten Strömung. Hier verliert sich, und zwar bei allen Drehzahlen in einer Entfernung von etwa 2/3 der Flüssigkeitshöhe vom Boden aus, die schräg gerichtete Bahn. Dort also löst sich die Strömung von der Behälterwand und beschreibt nun eine Drehung um 180°, um zum Ausgangspunkt, dem Rührer, zurückzukehren (Abb. 23). Dadurch entsteht bei R ein toter Raum, der bei geringer Drehzahl (Abb. 31) sich offensichtlich nur wenig an der Bewegung der Masse beteiligt, während bei 600 Umdr./Min. (Abb. 32) auch hier bereits einige Wirbel zu beobachten sind, und in Abb. 33 sogar eine wenn auch schwach ausgeprägte Abwärtsströmung festgestellt werden kann.

Abb. 32.

Rührblech 49 mm ∅ 40 mm breit
n = 600, Inh. 5 lit. Wasser m. Aluminiumpulver.

Abb. 31.

Rührblech 49 mm ∅ 40 mm breit
n = 400, Inh. 5 lit. Wasser m. Aluminiumpulver.

Abb. 33.

Rührblech 49 mm ∅ 40 mm breit
n = 800, Inh. 5 lit. Wasser u. Aluminiumpulver.

Die Strömungsaufnahme Abb. 34 zeigt den Rührvorgang mit dem gleichen Rührblech bei n = 450, und einem Behälterinhalt von 5000 ccm Wasser und 70 ccm Öl. Der tote Raum bei R wird hier bei der geringen Drehzahl von den Öltröpfchen nicht bestrichen. Man sieht deshalb durch ihn hindurch auf die spiralig ansteigende Bahn der Flüssigkeitsteilchen, die auf diese Weise bis zur Flüssigkeitsoberfläche verfolgt werden kann.

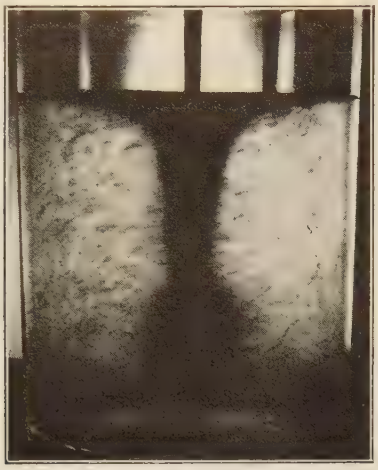


Abb. 34.

Rührblech 49 mm ∅ 40 mm breit
n = 450, Inh. 5000 cm³ Wasser u. 70 cm³ Öl.

Für einen größeren Durchmesser des Rührbleches von 100 mm ergab sich bei gleicher Breite und gleicher Umfangsgeschwindigkeit des Rührers wie in Abb. 31, also n = 196 Umdr./Min., ein Strömungsbild Abb. 35, das durch seine annähernd horizontalen Stromlinien die gesteigerte Drehbewegung der Masse erkennen läßt, die bereits Abb. 26 durch die Form der Absenkungslinie aufzeigte.

Bei Verwendung eines aufwärts arbeitenden Achsialrührers $\beta_1 = 30^0$ ergaben die Versuche mit Aluminiumpulver die Strömungsbilder Abb. 36 bei n = 400, Abb. 37 bei n = 600 und Abb. 38 bei n = 800 Umdr./Min. Die Zone des Ablösens der Strömung von der

Abb. 36.

Achsialrührer aufwärts wirkend
$\beta_1 = 30^0$, n = 400, Inh. 5 lit. Wasser u. Aluminiumpulver.

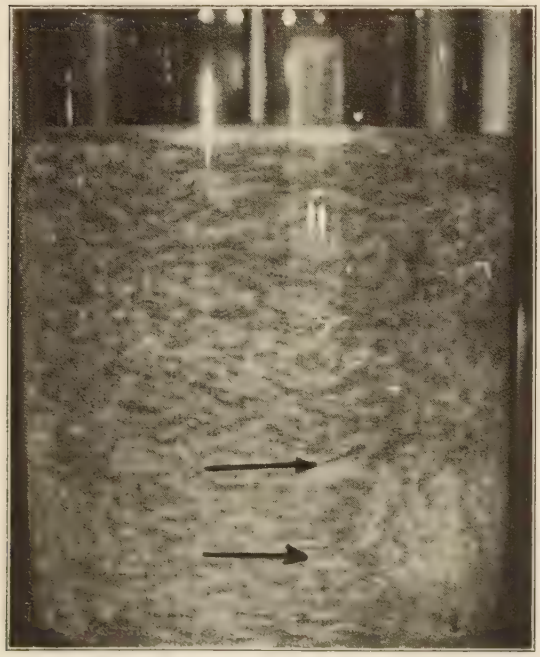


Abb. 35.

Rührblech 100 mm ∅ 40 mm breit
n = 196, Inh. 5 lit. Wasser u. Aluminiumpulver.

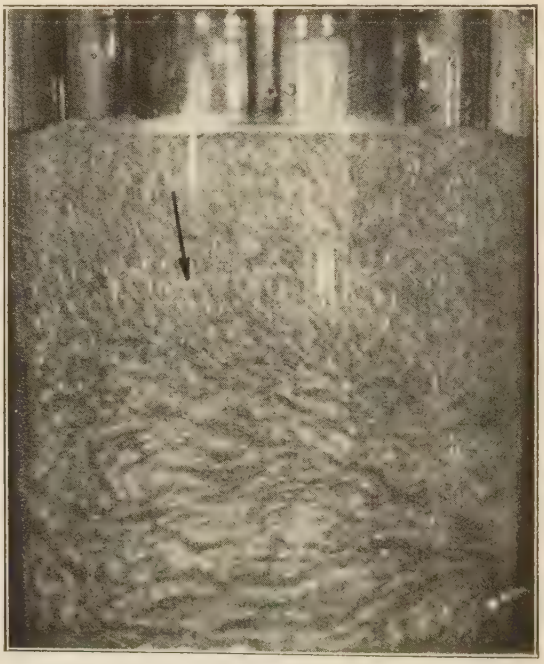


Abb. 37.

Achsialrührer aufwärts wirkend
$\beta_1 = 30^0$, n = 600, Inh. 5 lit. Wasser u. Aluminiumpulver.

Wand ist hier noch wesentlich stärker markiert, denn sämtliche Bilder weisen eine fast senkrechte und darunter eine horizontale Bewegungsrichtung auf, wobei in den horizontalen Bahnen mit zunehmender Drehzahl ebenso wie beim Rührblech 49 mm ∅ stärkere Wirbelbewegung und Aufwärtsneigung wahrzunehmen ist. Ein entsprechendes Bild für ein Öl-Wassergemisch ist in Abb. 9 Abschn. 1 gegeben. Es sieht allerdings wesentlich anders aus, da hier die Abwärtsbewegung der Öltropfen erfolgen muß, ehe sie in den Bereich des Rührers kommen und dort zerteilt werden. Die Tropfengröße ist also anfangs recht groß und deshalb ist ein hohes $v_0$ erforderlich, um die benötigte Sinktiefe zu erhalten. Trotz der also schon recht beträchtlichen Drehzahl von 450 Umdr./Min., die bei Aluminiumpulver bereits ein lebhaftes Strömungsbild erkennen läßt, ist darum in Abb. 9 gerade erst der Beginn einer Bewegung der Öltropfen wahrzunehmen.

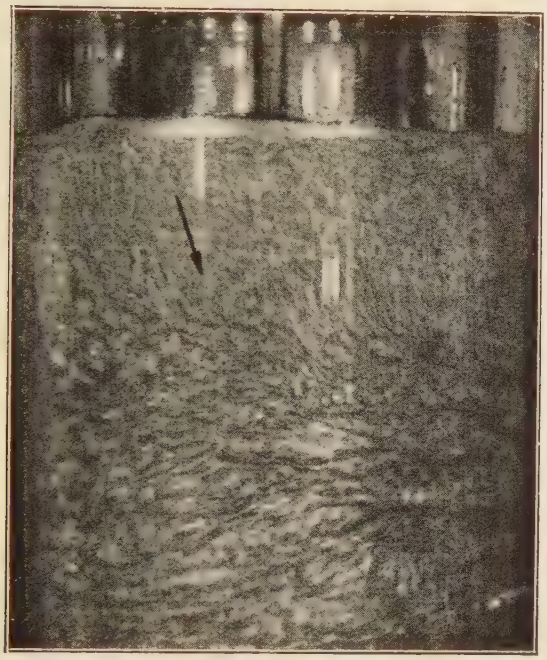


Abb. 38.

Achsialrührer aufwärts wirkend

$\beta_1 = 30^0$, n = 800, Inh. 5 lit. Wasser u. Aluminiumpulver.

Der abwärts arbeitende Achsialrührer $\beta_1 = 30^0$ schließlich liefert, wie Abb. 39 für n = 400 Umdr./Min. zeigt, die genau gleichen Erscheinungen, wie der aufwärts arbeitende, mit dem Unterschied, daß die horizontalen Strömungsbahnen jetzt über den vertikalen liegen, da bei dem nunmehr umgekehrten Kreislauf sich die Strömung nach der Flüssigkeitsoberfläche zu von der Wand ablöst. Die Aufnahme des Rührvorganges von 5000 ccm Wasser und 300 ccm Öl mit einem gleichartigen Rührer (Abb. 40) zeigt den gleichen Übergang von der vertikalen zur horizontalen Bewegung wie Abb. 39, der allerdings durch die Wirkung der Befestigungsschelle noch etwas verstärkt wird; und zwar tritt dieser Übergang in Höhe des Verdrängers auf, also dort, wo sich die vom Rührer erzeugte Drehbewegung nach außen fortpflanzen kann.

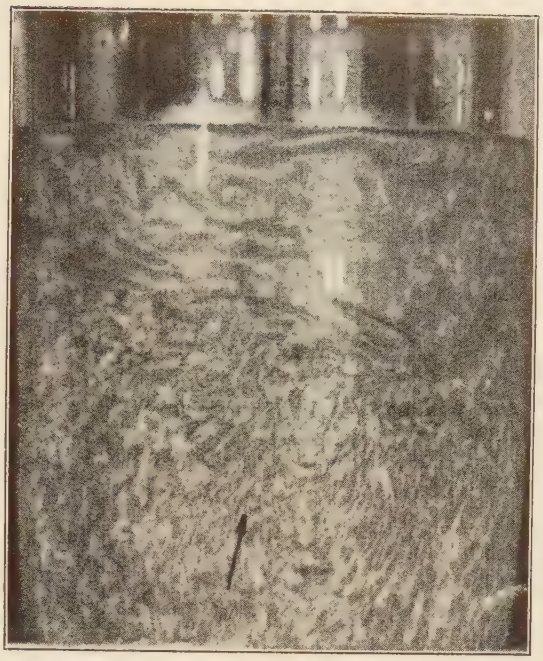


Abb. 39.

Achsialrührer abwärts arbeitend

$\beta_1 = 30^0$, n = 400, Inh. 5 lit. Wasser u. Aluminiumpulver.

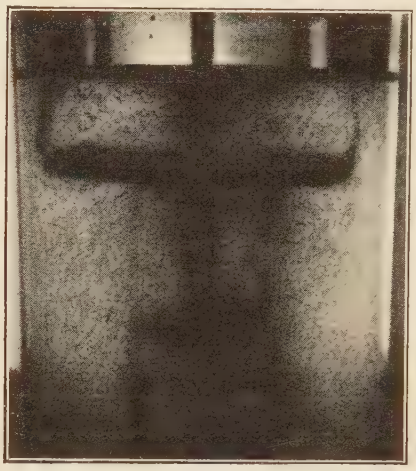


Abb. 40.

Achsialrührer abwärts wirkend

$\beta_1 = 30^0$, n = 480, Inh. 5000 cm³ Wasser u. 300 cm³ Öl.

Die Aufnahme Abb. 41 bringt noch den Verlauf der Bahnen bei Steigerung des Winkels $\beta_1$ auf 60° mit abwärts arbeitendem Achsialrührer. Die Aufnahme wurde mit einem Objektiv geringerer Lichtstärke und dementsprechend längerer Belichtungszeit als die bisher gezeigten Strömungsaufnahmen hergestellt. Dadurch ist die Strichzeichnung der Strömungsrichtung entstanden. Ein Vergleich mit Abb. 39 zeigt deutlich in welcher Weise größerer Winkel $\beta_1$ die Rotation der Masse beeinflußt, denn der in Abb. 39 fast vertikal verlaufende untere Teil der Strömung weist in Abb. 41 bereits eine erhebliche Neigung auf, sodaß also die Zunahme der Drehbewegung des Behälterinhaltes mit steigendem Winkel $\beta_1$ auch hier bewiesen ist.

Abb. 41.

Achsialrührer abwärts wirkend

$\beta_1 = 60^0$, n = 400, Inh. 5 lit. Wasser u. Aluminiumpulver.

Die in Abschn. 2 erwähnte günstige Wirkung der Rotation beim Anfahren, günstig in sofern, als hierdurch die leichtere Flüssigkeit abwärts gezogen und damit dem Rührer zugeführt wird, ist aber trotz des verschiedenen Einflusses auf die Drehbewegung der Masse beim Zentrifugalrührer wie beim Achsialrührer voll gewährleistet, wie die Aufnahmen des Anfahrzustandes beim Mischen von 4 Liter Wasser und 1 Liter Öl Abb. 42 und 43 für das Rührblech und Abb. 44 für das abwärts arbeitende Kaplanrad beweisen. Abb. 42 zeigt außerdem, daß bei diesem ersten horizontalen Ausstoßen der leichteren Flüssigkeit nur die kleineren Teilchen die Behälterwand erreichen, während die größeren Tropfen auf Grund ihres höheren p′ sofort aufwärtssteigen.

Abb. 42.

Rührblech 49 mm ∅ 40 mm breit

Anfahrzustand, Inh. 4 lit. Wasser u. 1 lit. Öl.

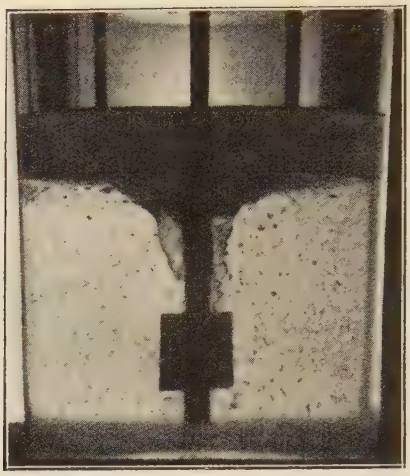


Abb. 43.

Rührblech 49 mm ∅ 40 mm breit

Anfahrzustand, Inh. 4 lit. Wasser u. 1 lit. Öl.

Abb. 44.

Achsialrührer abwärts wirkend

$\beta_1 = 15^0$, Anfahrzustand, Inh. 4 lit. Wasser u. 1 lit. Öl.

Der in den verschiedenen Strömungsaufnahmen festgestellte unterschiedliche Ausfall des Verhältnisses von $\frac{v_0}{c_u}$ kann unter bestimmten Umständen für das Mischen von ausschlaggebender Bedeutung sein; denn nach Gleichung 9) ist, da $\omega = \frac{c_u}{r}$, $\frac{v_0}{c_u} = \sqrt{\frac{2\,p'}{g}}$ für das Maximum der Wegkurve, also eine zweite Bestimmung von $\frac{v_0}{c_u}$ allein durch die Eigenschaften der zu mischenden Stoffe vorhanden. Wird also $\frac{v_0}{c_u} > \sqrt{\frac{2\,p'}{g}}$ so stellt sich $z < \frac{g}{\omega^2}$ ein, was nach den Ausführungen in Abschn. 2 durchaus erwünscht ist. Ist der Ausdruck $\frac{v_0}{c_u}$ dagegen $< \sqrt{\frac{2\,p'}{g}}$, so ist der gewählte Rührer für das Mischen unbrauchbar, da die Wegkurve der leichteren Teile dann über der A-B-Linie (Abb. 20) liegt, also ein Eindringen in das schwerere Medium überhaupt nicht erfolgt.

Den Beweis hierfür liefert ein Versuch, eine Schicht Korkmehl mit einer Teilchengröße von etwa 1 mm³ mittels eines Rührbleches mit Wasser zu vermischen. p′ ist hier infolge der großen Differenz $(\gamma_2 - \gamma_1)$ und der unveränderlichen Teilchengröße sehr hoch; infolgedessen war es unmöglich, mit einem als Zentrifugalrührer wirkenden Rührblech, welche Dimension auch gewählt wurde, ein Eindringen des Korkmehles in das Wasser zu ermöglichen. Wie Abb. 45 für ein Rührblech 80 mm ∅ 40 mm breit bei n = 350 beweist, blieb das gesamte Korkmehl zusammengeballt am tiefsten Punkt der Absenkungsfläche. Wählt man dagegen für einen solchen Mischvorgang einen Achsialrührer, bei dem, wie in einer Reihe von Strömungsaufnahmen bewiesen wurde, ein wesentlich größeres Verhältnis $\frac{v_0}{c_u}$ vorhanden ist, so bleibt auch bei dem hohen Wert p′ für den Versuch mit dem Korkmehl $\frac{v_0}{c_u} > \sqrt{\frac{2\,p'}{g}}$. Mit diesem Rührer ist also eine Mischung möglich, wie aus Abb. 46 einem Versuch mit abwärts arbeitendem Achsialrührer $\beta_1 = 30^0$ und n = 300 Umdr./Min. bezw. Abb. 47, dem gleichen Vorgang bei n = 400 Umdr./Min. hervorgeht.

Abb. 45.

Rührblech 80 mm ∅ 40 mm breit
n = 350. Inh. 5 lit. Wasser mit Korkmehl.

Abb. 46.

Achsialrührer abwärts wirkend
$\beta_1 = 30^0$, n = 300, Inh. 5 lit. Wasser mit Korkmehl.

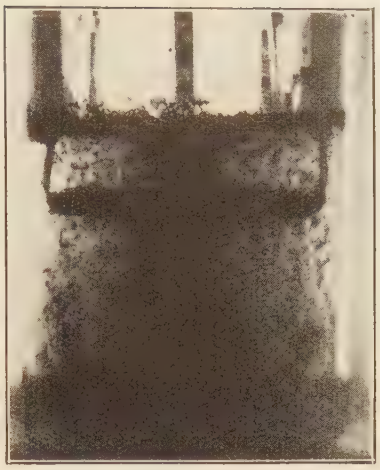


Abb. 47.

Achsialrührer abwärts wirkend
$\beta_1 = 30^0$, n = 400, Inh. 5 lit. Wasser mit Korkmehl.

Schließlich ist außer der Erzeugung der Mischgeschwindigkeit und dem Einfluß auf die Rotation der Flüssigkeit für jeden Rührer noch die Bedingung vorhanden, daß die geförderte Menge möglichst ungehindert dem Rührer wieder zufließen kann. In dieser Hinsicht wirkt das einfache Rührblech günstig, denn es gestattet der Flüssigkeit, ungehindert den Kreislauf zu vollziehen und je nach der Lage der durch die Drehbewegung bedingten Oberfläche seinen Weg zu ändern. Dabei wird ein Teil der Flüssigkeit auf seiner Bahn den Rührer garnicht erreichen, sondern bereits vorher von der nach außen strömenden Menge mitgerissen werden, sodaß sich ein Strömungsbild ergibt, wie es in Abb. 23 angedeutet ist. Das unmittelbare Zusammentreffen entgegengesetzt gerichteter Strömungen erzeugt zudem natürlich lebhafte Wirbelbildung und unterstützt dadurch den Vorgang der Mischung, leistet also auch Gewähr, daß sich die Flüssigkeit nicht in so geordneten Bahnen bewegt wie dargestellt, sondern ständig ein starker Wechsel von den inneren nach den äußeren Kreisläufen und umgekehrt vorhanden ist.

Eine einem Turbinenrad nachgebildete Rührerform, mit einem äußeren Schaufelkranz, ist also für die hier angedeutete Flüssigkeitsbewegung mehr oder weniger ungünstig. Bei einem solchen Rade (Abb. 48) — denn ent-

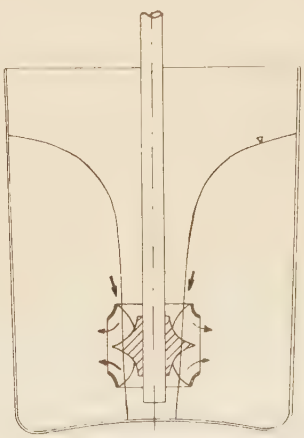


Abb. 48.

sprechend der geringen Förderhöhe käme ja nur ein Modell hoher spezifischer Drehzahl in Frage — ist natürlich bald durch die Form der Absenkungsfläche der erforderliche Zufluß stark behindert, wenn nicht gar von der oberen Seite völlig unterbunden, sodaß die gewünschte Wirkung nicht zur Geltung kommen kann.

Beim Achsialrührer besteht durch die Anordnung des Verdrängerrohres eine zwangläufige Führung der Flüssigkeit. Wenn man die Vorteile dieses Rührers, die in der geringeren Drehbewegung der Masse liegen, zur Geltung kommen lassen will, so darf der Durchmesser des Verdrängers $d_v$ nicht zu groß, seine Höhe $h_v$ nicht zu klein sein; denn da innerhalb des Verdrängers ohne Verwendung von Leitblechen ein Rotieren der Masse unvermeidlich ist, hat großes $d_v$ zur Folge, daß ein verhältnismäßig großer Teil des Behälterinhaltes sich an der Drehbewegung beteiligt, und geringes $h_v$ läßt, wie die Strömungsbilder zeigen, ein starkes Übergreifen der Drehbewegung nach außen zu. Andererseits ist aber auch zu berücksichtigen, daß bei $d_v < \frac{d}{2}\sqrt{2}$ in dem Verdränger eine Geschwindigkeit, die höher als die erforderliche Mischgeschwindigkeit ist, erzeugt werden muß. Hierzu ist eine Steigerung der Drehzahl und damit aller der durch den mechanischen Antrieb bedingten Reibungsverluste erforderlich, und weiterhin muß die Flüssigkeit auf ihrem Kreislauf ständig entsprechend der Geschwindigkeitsänderung beschleunigt und verzögert werden, wofür gleichfalls ein zusätzlicher Energieaufwand benötigt wird. Man wird also die Verringerung von $d_v$ unter den Wert $\frac{d}{2}\sqrt{2}$ ohne zwingenden Grund nicht allzuweit treiben.

Eine ganz erhebliche Bedeutung kommt zweifellos der Wahl von $h_v$ zu. Geht man nämlich in dem Bestreben, $h_v$ nicht zu klein zu halten, zu weit, so kann beim abwärtsarbeitenden Achsialrührer leicht der Zustand eintreten, daß ein ungehinderter Zufluß zum Rührer nicht mehr gewährleistet ist. Versucht man durch Steigerung der Drehzahl diesen Mißstand zu beheben, so wandert gleichzeitig die Absenkungslinie immer mehr nach außen, sodaß die Rückflußverhältnisse nun ungünstiger liegen als zuvor. Das gleiche tritt ein bei einer Steigerung des Winkels $\beta_1$, der ja wie nachgewiesen, ebenfalls eine größere Massenrotation, also eine Verschiebung der Absenkungslinie nach außen zur Folge hat. Ein zu groß gewähltes $h_v$ kann demnach beim abwärts arbeitenden Kaplanrad zu der Tatsache führen, daß eine nennenswerte Förderung überhaupt nicht zu erreichen ist, da jede Maßnahme, die Flüssigkeitshöhe im äußeren Ringraum zu steigern, die Absenkungsfläche für den Zufluß ungünstiger gestaltet. Da eine einwandfreie Vorausbestimmung der Flüssigkeitsoberfläche bei der vorgesehenen Drehzahl, die eine Ermittelung der für den Zufluß zur Verfügung stehenden Querschnittsfläche ermöglichen würde, hier auf Schwierigkeiten stößt, ist man auf Annahmen für $h_v$ angewiesen. Hierbei bleibt zu beachten, daß ein zu klein gewähltes $h_v$ einen geringeren Nachteil bringt als ein zu großes.

Beim aufwärts arbeitenden Achsialrührer dagegen liegen wesentlich andere Voraussetzungen vor. Die Lage der Absenkungslinie, die beim abwärts Arbeiten hauptsächlich bestimmend für die Bemessung des Verdrängers war, verliert beim aufwärts Arbeiten an Bedeutung; denn der Rührer drückt die Flüssigkeit gerade in der Mitte nach oben und arbeitet damit der sich bildenden Absenkung entgegen (vergl. Abb. 29). Es ist auf diese Weise möglich, den Flüssigkeitskreislauf recht genau festzulegen, wobei durch entsprechende Leitorgane, wie sie in der Patentschrift Nr. 474 801 festgelegt sind, die Arbeit verzehrende Wellen- und Wirbeloberfläche vermindert werden kann. Aber es ist auch nicht zu verkennen, daß hier teilweise den Naturgesetzen entgegengearbeitet wird; denn wenn, wie in Abschn. 2 und in Abb. 42, 43 und 44 gezeigt wurde, beim Anfahren infolge der Drehbewegung die leichtere Flüssigkeit sich nach der Mitte zu senkt, so drückt der aufwärts arbeitende Rührer sie wieder von sich weg und muß um mischend zu wirken, die Geschwindigkeit derart hoch treiben, daß die leichtere Flüssigkeit im äußeren Ringraum nach unten gesaugt wird (vergl. Seite 15 und Abb. 9). Unter gleichen Bedingungen erfordert also der aufwärts arbeitende Achsialrührer höhere Drehzahl und damit auch höheren Kraftbedarf als ein abwärts arbeitender mit zweckentsprechend bemessenem Verdränger.

4. Abschnitt.

# Mischversuche

## A. Versuchsanordnung u. Meßverfahren.

Um ein Bild darüber zu erhalten, wie weit die einzelnen bisher behandelten Erscheinungen bei den verschiedenen Rührern sich zahlenmäßig beim Mischen zweier Flüssigkeiten auswirken, wurden einige Versuchsreihen durchgeführt, die einen Vergleich bezüglich der Wirtschaftlichkeit bieten sollen. Bei sämtlichen Untersuchungen wurde ausgegangen von einer Behälterfüllung von 4 Liter Wasser und 1 Liter Öl. Die Temperatur der Flüssigkeiten betrug stets etwa 20° C. Das verwendete Öl ist ein Teeröl mit einem spez. Gewicht von 0.814 und einer Zähigkeit, die mit dem Engler Viskosimeter zu 1,11 Engler Graden festgestellt wurde. Die kinematische Zähigkeit ist demnach nach Ubbelohde $\nu = 0.0732\ E - \frac{0,0631}{E} =$ 0.0243 cm²/Sek.

Für die Versuche wurde ein Glasbehälter benutzt, dessen Abmessungen und Anordnung aus der schematischen Darstellung Abb. 49 hervorgeht. Die Rührerwelle ist unmittelbar gekuppelt mit einem Gleichstrommotor, dessen Umdrehungszahl durch einen als Spannungsteiler vorgeschalteten Schiebewiderstand 215 Ohm 2 Amp. reguliert werden kann. Die Spannung wird mit einem Voltmeter (Multiva) Meßbereich

30 Volt, die Stromstärke mit einem Gosseninstrument unter Benützung der jeweils für die Ablesung günstigsten Shunts gemessen. Über dem Antriebsmotor ist ebenfalls direkt mit der Motorwelle gekuppelt ein Umdrehungszähler angeordnet für Drehzahlablesungen von 100—4000 Umdr./Min. in drei Meßbereichen. Es ist somit möglich, für jeden Versuchsfall Drehzahl und Kraftbedarf festzustellen. Der aus den Werten für Spannung und Stromstärke zu ermittelnde Kraftbedarf enthält jedoch auch die zur Betätigung des Umdrehungszählers erforderliche Leistung und den Wirkungsgrad des Motors. Für die Vergleichswerte kann aber nur die tatsächlich an der Welle abgegebene Leistung in Frage kommen. Deshalb wurde durch eine Reihe von Bremsversuchen mit Hilfe der in Abb. 30 schematisch angedeuteten Anordnung der Kraftbedarf unmittelbar an der Rührerwelle gemessen und so der Gesamtwirkungsgrad in Abhängigkeit der abgelesenen Leistung für den in Betracht kommenden Drehzahlbereich ermittelt (Abb. 31). Die $\eta$ Werte liegen sehr niedrig, da bei dem geringen Kraftverbrauch die vom Tachometer verbrauchte Energie stark ins Gewicht fällt. Sämtliche Bremsversuche wurden bei der mittleren Einstellung des Umdrehungszählers (n = 300 bis 1200) vorgenommen.

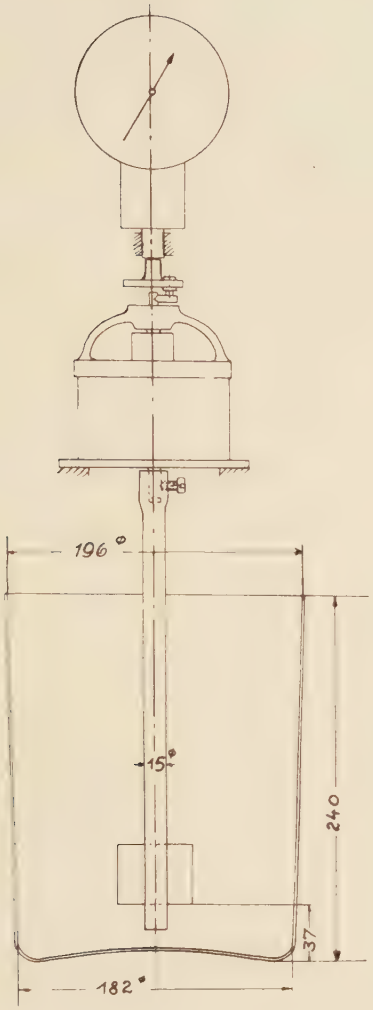



Abb. 49.

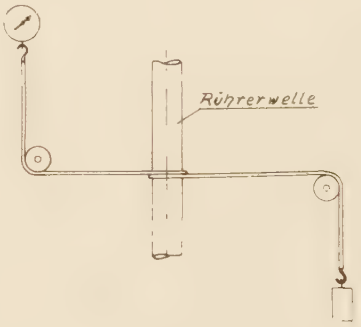



Abb. 50.

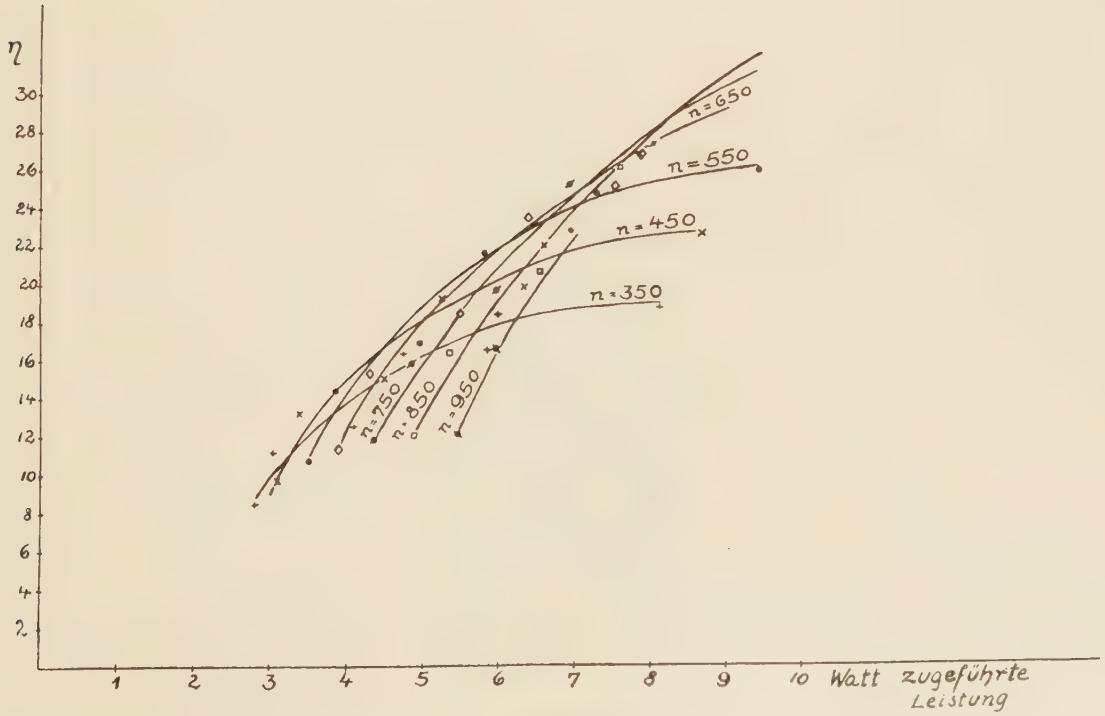



Abb. 51.

Für den Vergleich von besonderer Wichtigkeit war die Bestimmung des jeweiligen Mischungsverhältnisses. Da es sich um Komponenten handelt, die sich nach Beendigung der Mischbewegung wieder trennen, ist eine chemische oder optische Feststellung unmöglich. Es wurde deshalb eine reine Volumenmessung vorgenommen und zwar derart, daß an verschiedenen Stellen des Behälters mit Meßpipetten von 20 ccm Inhalt während des Rührvorganges Proben aus dem Versuchsgefäß entnommen wurden, aus denen dann nach Absitzen der Flüssigkeit das Verhältnis von Öl und Wasser feststellbar war. Eine Anzahl Messungen dieser Art gaben unter gleichen Voraussetzungen Werte mit guter Übereinstimmung. Aus Zweckmäßigkeitsgründen wurde bei dem weiteren Verlauf der Versuche das Mischverhältnis als das Verhältnis

$$\frac{\text{Volumen der entnommenen Probe}}{\text{Volumen des in der Probe enthaltenen Öles}}$$

festgestellt. Unter dem Begriff „Mischverhältnis" sei also in der Folge dieser Wert verstanden, der mit der Abkürzung MV bezeichnet werden soll. Bei den für die Versuche verwendeten Mengen von 1 Liter Öl und 4 Liter Wasser ist demnach während des Ruhezustandes

für eine Probe aus dem Gebiete des Öls MV = 1
für eine Probe aus dem Gebiete des Wassers
MV = ∞.

Für eine vollkommene Mischung dagegen muß in der Probe das gleiche Raumverhältnis wie in dem gesamten Flüssigkeitsinhalt also $MV_i = 5$ vorhanden sein.

Ein Mischrührvorgang muß einen allmählichen Übergang etwa in der Form darstellen, wie er zunächst ganz willkürlich in Abb. 52 punktiert angedeutet ist.

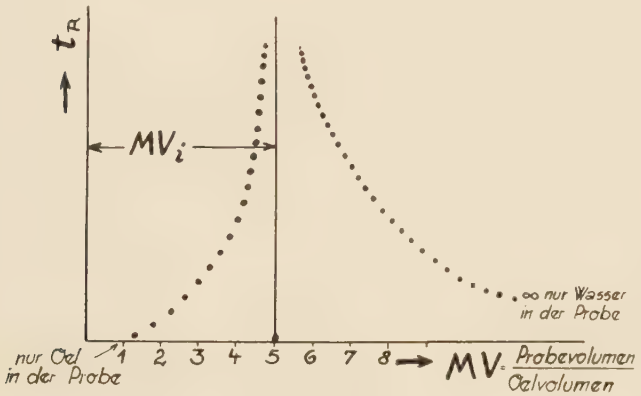



Abb. 52.

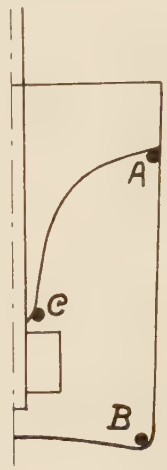



Abb. 53.

Die genaue Lage dieses Überganges wurde durch den Versuch bestimmt und zwar für Rührbleche von 50, 60 und 80 mm ∅ bei jeweils 40 mm Breite. Die Punkte, an denen die Proben entnommen wurden, waren (Abb. 53) Punkt A am äußeren Rande des Behälters an der Flüssigkeitsoberfläche, Punkt B am äußeren Rande des Behälterbodens und Punkt C am Flüssigkeitspiegel unmittelbar über dem Rührblech. Für den Rührer 80 mm ∅ ergab sich auf diese Weise die Darstellung Abb. 54, die im räumlichen Koordi-

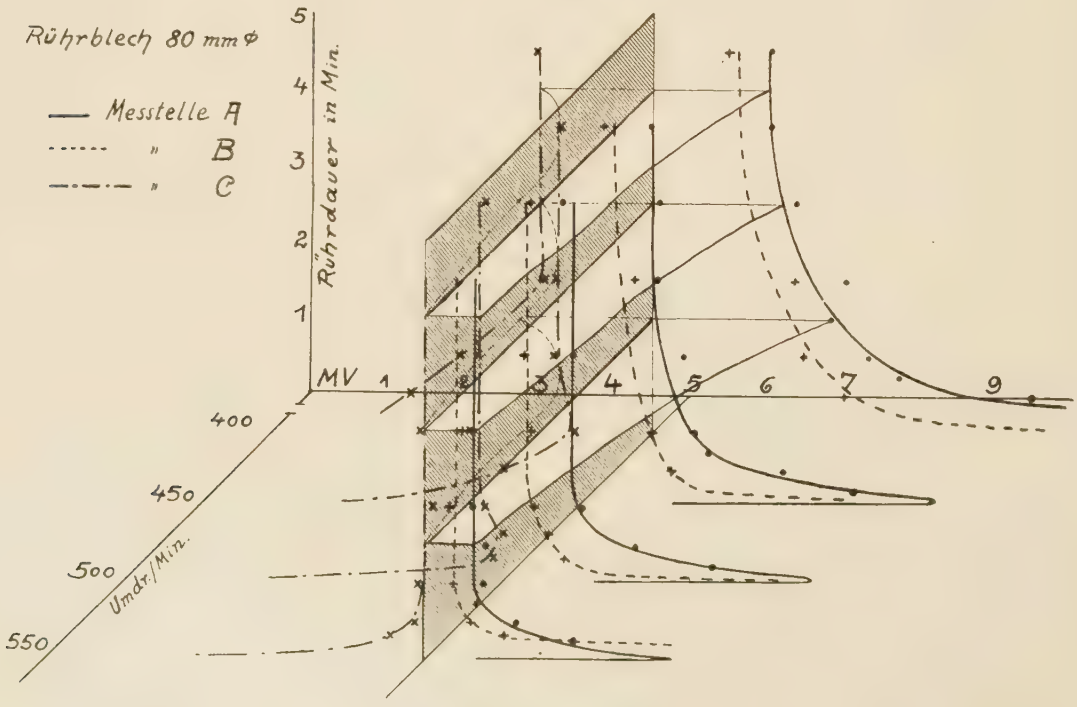



Abb. 54.

natensystem das erzielte Mischungsverhältnis in Abhängigkeit der Zeit für n = 400, 450, 500 und 550 Umdr./Min. zeigt. Während also der Verlauf bei B und C etwa dem in Abb. 52 angedeuteten Übergang entspricht, liegen die Ergebnisse an der Meßstelle A wesentlich anders. Hier steigt MV vom Wert 1 im Ruhezustand sofort nach Beginn des Rührvorganges auf weit über 5, überschneidet die B-Kurve und bleibt auch nach längerer Rührdauer noch höher als die entsprechenden Werte bei B. Der Rührer zieht also sofort den größten Teil der Ölmenge nach der Mitte (vergl. Abb. 18) und aufgrund der starken Rotation des Inhaltes verläuft die vertikale Bahn der Ölteilchen gemäß Abb. 21 so, daß der tote Raum R (vergl. Abb. 23), in dem der Meßpunkt A liegt, nur in geringem Maße von der leichteren Flüssigkeit erreicht wird, also dort die ungünstigsten Werte MV gemessen werden.

Die gleichen Messungen in den Punkten A und B bei 60 mm Rührerdurchmesser und n = 500, 600 und 650 Umdr./Min. liefern das Bild Abb. 55. Gerade hier ist klarstens das allmähliche Überschneiden der A- und B-Kurve mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit zu erkennen. Noch einen Schritt weiter führt die Darstellung Abb. 56 für 50 mm Rührdurchmesser und n = 650, 750 und 850 Umdr./Min., wo die A-Werte stets günstiger als die B-Werte liegen. Der Meßpunkt C wurde in Abb. 55 und 56 weggelassen, da er für

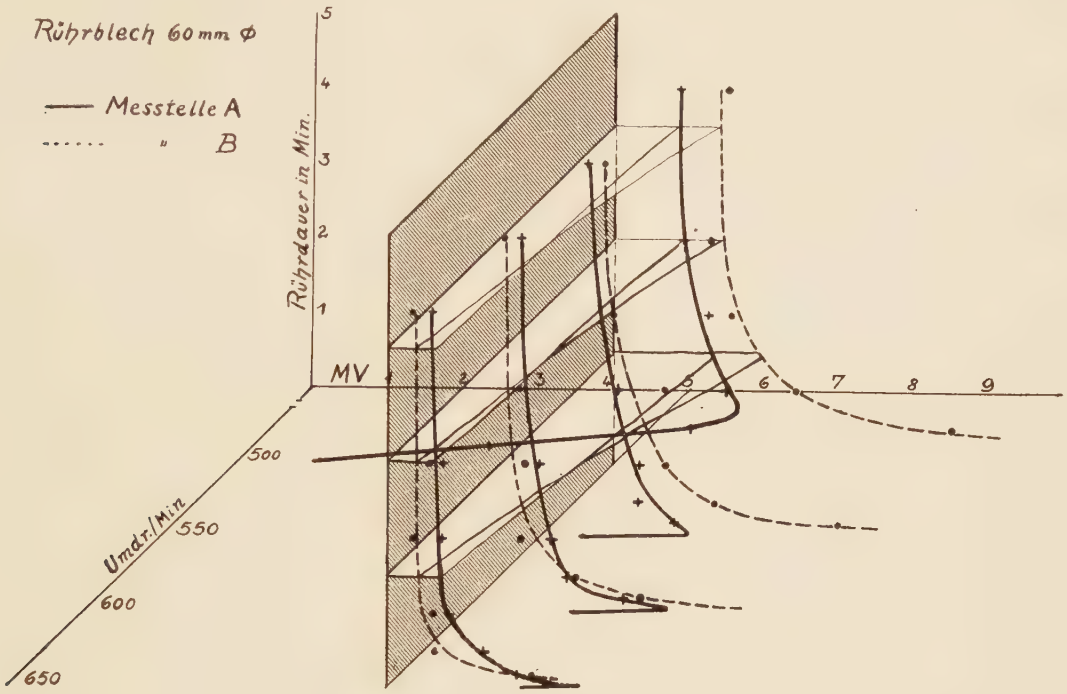



Abb. 55.

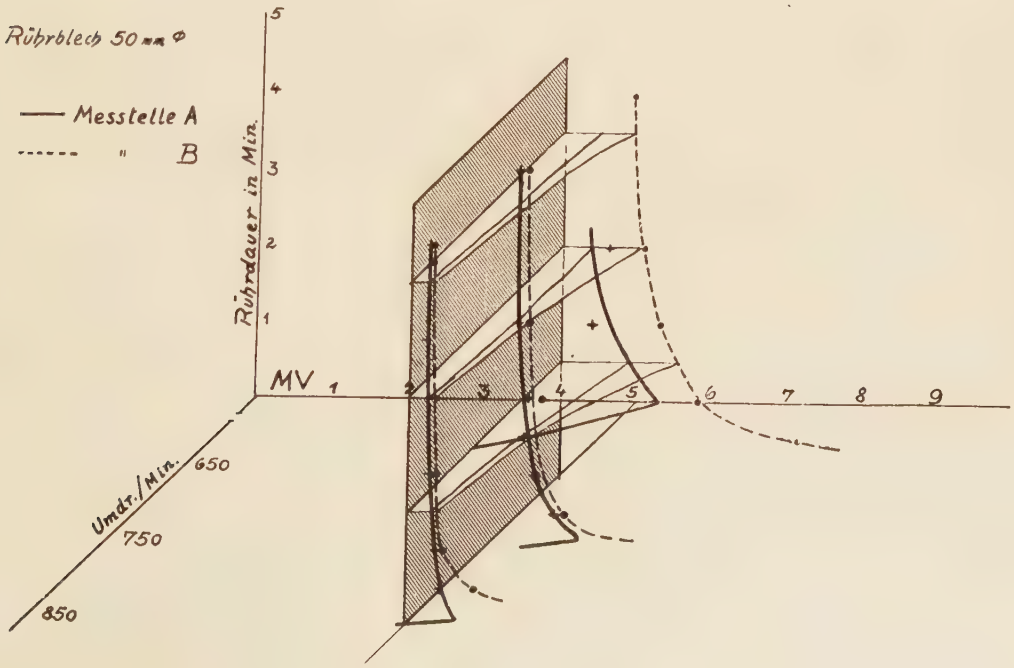



Abb. 56.

die weitere Behandlung unwesentlich ist. Allen drei Darstellungen gemeinsam ist aber das klare Zustreben aller Werte nach dem Mischverhältnisse 5, wobei jedoch durchweg nach der Versuchsdauer von 5 Minuten starke Annäherung der Kurven an die Senkrechte festzustellen ist. Auch Messungen nach 30 Minuten Rührdauer brachten nur ganz unwesentliche Verbesserungen der Mischverhältnisse. Um also brauchbare Vergleichswerte der einzelnen Rührerformen zu erhalten, ist es versuchstechnisch nicht möglich, wie es nahe liegt, den Arbeitsbedarf zur Erreichung eines bestimmten Mischverhältnisses für jeden zu untersuchenden Rührer festzustellen. Es mußte vielmehr der Weg beschritten werden, das erreichte Mischverhältnis jedes Rührers nach einer bestimmten Zeit und die hierfür benötigte Arbeit zu untersuchen.

Diese Aufgabe liegt den weiteren Versuchen zugrunde. Als Rührdauer ist für alle Werte eine Zeit von 5 Minuten gewählt. Da das Mischverhältnis nicht völlig gleichmäßig über den ganzen Behälter verteilt ist, wurde als Vergleichsgröße der ungünstigste Wert am äußeren Rande des Behälters festgelegt, der nach den ermittelten Proben entweder am Flüssigkeitsspiegel oder am Behälterboden also bei A oder B (Abb. 53) liegt. Abgesehen davon, daß diese Punkte ihrer Lage nach eindeutig festliegen, und es somit versuchstechnisch möglich ist, die einzelnen Mischproben unter gleichen Voraussetzungen zu erhalten, kann man nach den bisherigen Feststellungen auch annehmen, daß bei A oder B stets die Gebiete geringsten Ölgehaltes liegen, so daß für den dort erhaltenen Wert $MV_R$ gilt:

$$MV_R - MV_i > \pm (MV_x - MV_i),$$

wenn $MV_x$ das Mischverhältnis an einem beliebigen anderen Punkt des Behälterinhaltes bezeichnet.

Der Kraftbedarf erwies sich bei allen Versuchen abgesehen von der sehr geringen Anfahrzeit des Motors von nur wenigen Sekunden während der ganzen Rührzeit als constant, so daß in den weiteren Darstellungen der gemessene Kraftbedarf für die einzelnen Versuche gegenübergestellt wurde, aus dem die aufgewendete Arbeit durch Multiplikation mit der Rührzeit von 5 Minuten zu ermitteln ist.

## B. Zentrifugalrührer.

Um für die Versuche möglichst gleichmäßige Voraussetzungen zu schaffen, wurde für die Erzeugung der Zentrifugalmischbewegung Abb. 1 ein einfaches Rührblech gewählt, dessen Durchmesser zunächst bei konstanter Breite verändert wurde. Über die günstige Wirkung gerade dieser Form auf die Zerteilung der Flüssigkeit und eine einwandfreie Strömungsführung wurde bereits in Abschn. 3 berichtet. Sie hat zudem den Vorteil überaus einfacher Herstellung, und gerade deshalb war sie nicht nur für den Versuchsaufbau günstig, sondern hat auch für die praktische Verwendung besondere Bedeutung überall da, wo die Bedingung möglichst zugänglicher und einfacher Konstruktion gestellt ist mit Rücksicht auf Materialfragen, also z. B. im Falle einer erforderlichen Gummierung oder Versilberung der Teile.

Die Breite des Rührbleches wurde mit 40 mm festgelegt und hierfür bei 100, 80, 60, 50 und 35 mm ∅ Mischversuche vorgenommen. Gemessen wurde jeweils für eine Reihe von Drehzahlen das nach einer Rührdauer von 5 Minuten schlechteste Mischverhältnis am äußeren Rande des Behälters und der hierbei erforderliche Kraftbedarf an der Welle, der mit Hilfe der Wirkungsgradkurven Abb. 54 aus den abgelesenen Werten errechnet wurde. Das Ergebnis ist in der Tabelle Abb. 57 zusammengestellt. Die aufgewendete Arbeit in Wattsekunden ist also L = 300 N. Abb. 58

| Rührerdurchm. mm | n Umdr./Min. | $MV_R$ nach 5 Min. Rührdauer | zugeführte Leistung $N_{ges.}$ Watt | $\eta$ % | Kraftbedarf an der Welle N Watt |
|---|---|---|---|---|---|
| 100 | 300 | 7,45 | 4,37 | 14 | 0,612 |
| 100 | 350 | 6,3 | 5,48 | 16,4 | 0,9 |
| 100 | 400 | 6,05 | 9 | 21 | 1,89 |
| 100 | 450 | 5,58 | 11,25 | 23 | 2,59 |
| 80 | 400 | 6,55 | 4,63 | 16,2 | 0,75 |
| 80 | 450 | 6,05 | 5,18 | 18,5 | 0,96 |
| 80 | 500 | 5,78 | 6,4 | 22 | 1,41 |
| 80 | 550 | 5,53 | 7,65 | 24,8 | 1,9 |
| 80 | 600 | 5,45 | 8,55 | 27 | 2,31 |
| 80 | 650 | 5,42 | 9,3 | 29,4 | 2,73 |
| 60 | 500 | 6,43 | 3,5 | 11,8 | 0,413 |
| 60 | 550 | 5,85 | 4,1 | 14,8 | 0,607 |
| 60 | 600 | 5,75 | 4,98 | 18,4 | 0,917 |
| 60 | 650 | 5,58 | 5,94 | 21,5 | 1,275 |
| 50 | 550 | 8,6 | 3,36 | 9,3 | 0,312 |
| 50 | 650 | 5,92 | 3,63 | 9,8 | 0,356 |
| 50 | 750 | 5,52 | 4,65 | 13,8 | 0,642 |
| 50 | 850 | 5,3 | 6 | 19 | 1,14 |
| 35 | 1000 | 5,62 | 5,2 | 8 | 0,416 |
| 35 | 1100 | 5,4 | 5,94 | 9 | 0,535 |

Abb. 57.

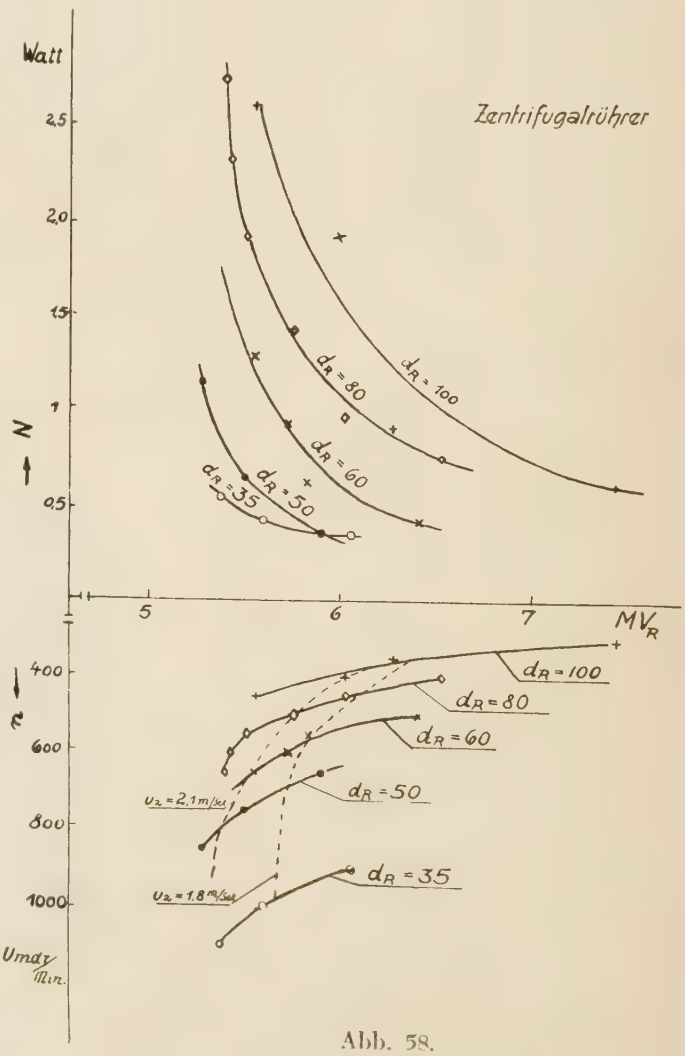



Abb. 58.

bringt das graphische Bild der Tabellenwerte und zwar $MV_R$ in Abhängigkeit von N und n. Schon diese Darstellung liefert den Beweis, daß für gleiches $MV_R$ der Kraftverbrauch um so geringer wird je kleiner der Rührerdurchmesser ist, wobei allerdings dem kleineren $d_R$ auch die höhere Drehzahl zugeordnet ist. Noch klarer treten die Zusammenhänge in Abb. 59 hervor, wo aus Abb. 58 die Werte N und n für jeweils constantes $MV_R$ in Abhängigkeit des Rührerdurchmessers aufgetragen sind. Die Begründung dieser Ergebnisse ist aus dem Austrittsdreieck des Rührers zu ersehen. Es hat für $d_R$ = const. bei veränderlicher Drehzahl etwa die Form Abb. 60 und zeigt für die einzelnen Werte von $u_2$ eine Veränderung von $c_{2m}$, die im wesentlichen dem Verlauf von $MV_R$ in Abhängigkeit von n entspricht. Daß bei unveränderter Umfangsgeschwindigkeit der Rührer geringeren Durchmessers überlegen ist, findet seine Begründung in der verschiedenen Massenrotation, über die in Abschn. 3 bereits näher berichtet ist.

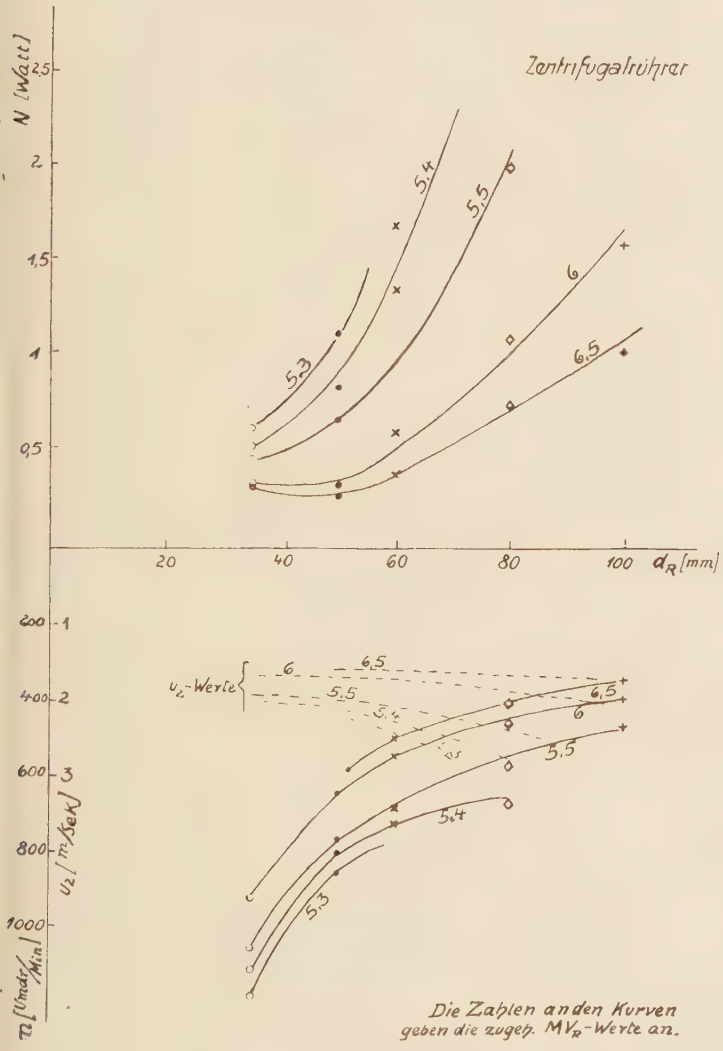



Abb. 59.

Abb. 60.

Nach Abb. 59 steigt n annähernd hyperbolisch und würde theoretisch bei Rührerdurchmesser = 0 den Wert $\infty$ erreichen. Hier sind also praktisch sehr klare Grenzen gezogen, denn mit zunehmender Drehzahl steigt auch die Lager- und Stopfbüchsenreibung des Antriebes und der günstigste Durchmesser befindet sich dort, wo Mischarbeit + Reibungsarbeit ein Minimum hat (Abb. 61). Seine Lage ist also auch abhängig von der Konstruktion der Antriebs- bezw. Kraftübertragungsteile. Im Versuchsfalle wurde der günstigste Durchmesser durch Gegenüberstellung der zugeführten Leistung $N_{ges}$ (Abb. 57 und 62) bei 49 mm ∅ ermittelt.

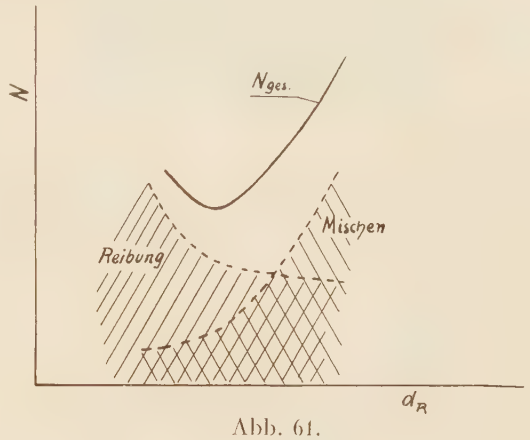



Abb. 61.

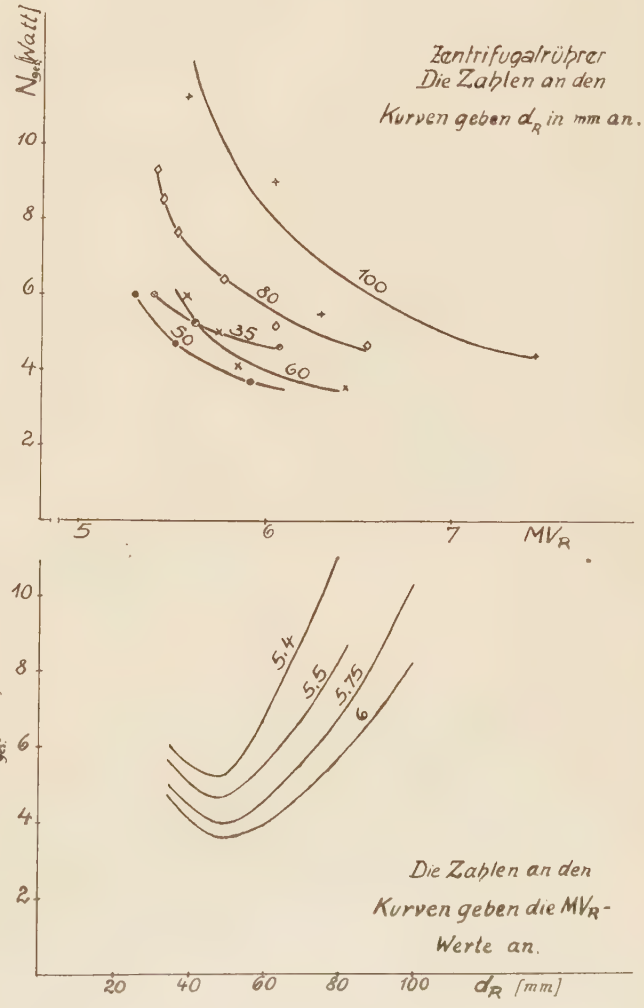



Abb. 62.

Durch Veränderung der Breite bei diesem Durchmesser wurde weiterhin untersucht, welche Zusammenhänge hier zwischen Kraftbedarf und $MV_R$ bestehen. Die Versuche hierüber gestalteten sich weit schwieriger, da die erhaltenen Werte jeweils nur geringe Unterschiede aufweisen und ein gewisses Streuen der Versuchsergebnisse bei der ganzen Art des Meßverfahrens unvermeidlich war. Aus den Mittelwerten mehrfach wiederholter Messungen ergab sich schließlich das Bild Abb. 63, dessen Werte in der Tabelle Abb. 64 zusammengestellt sind. Die Darstellungsform ist die gleiche wie in Abb. 58. Aus diesen sich offenbar recht willkürlich überschneidenden Kurven schält sich bei Ermittelung des Kraftbedarfes in Abhängigkeit der Rührerbreite für jeweils konstantes Mischverhältnis $MV_R$ die Darstellung Abb. 65 heraus.

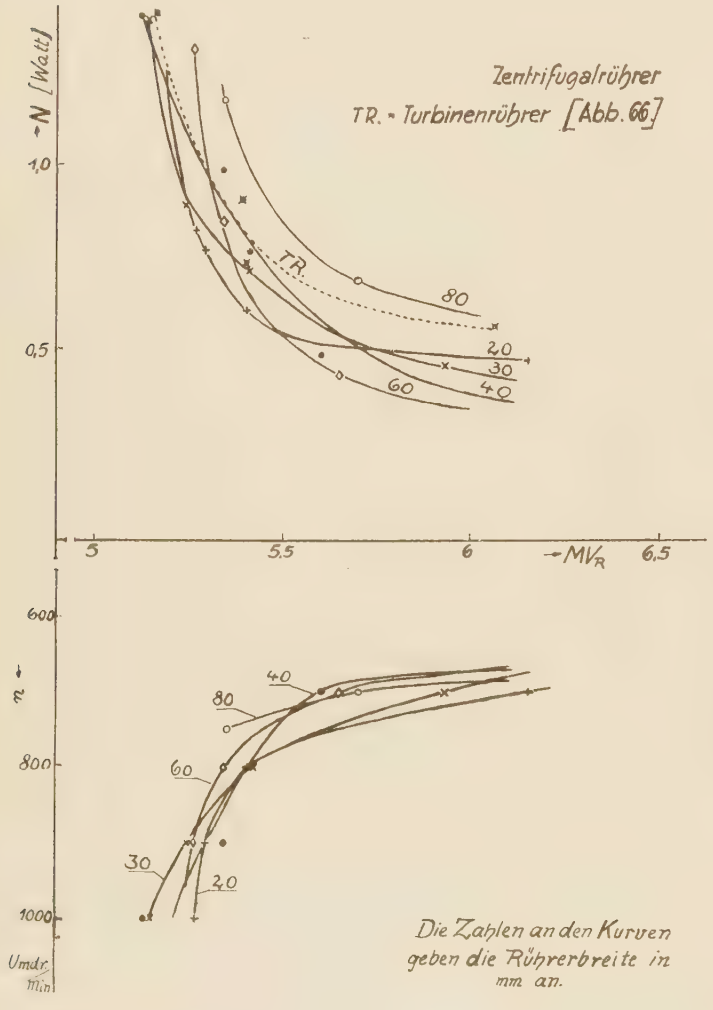



Abb. 63.

| Rührerbreite mm | n Umdr./Min. | $MV_R$ nach 5 Minuten Rührdauer | N Kraftbedarf an der Welle Watt |
|---|---|---|---|
| 20 | 700 | 6,16 | 0,474 |
| 20 | 800 | 5,41 | 0,606 |
| 20 | 900 | 5,30 | 0,766 |
| 20 | 1000 | 5,275 | 0,817 |
| 30 | 600 | 6,77 | 0,358 |
| 30 | 700 | 5,94 | 0,46 |
| 30 | 800 | 5,42 | 0,7115 |
| 30 | 900 | 5,25 | 0,882 |
| 30 | 1000 | 5,15 | 1,38 |
| 40 | 600 | 7,48 | 0,239 |
| 40 | 700 | 5,61 | 0,483 |
| 40 | 800 | 5,425 | 0,76 |
| 40 | 900 | 5,35 | 0,98 |
| 40 | 1000 | 5,13 | 1,39 |
| 60 | 600 | 8,1 | 0,159 |
| 60 | 700 | 5,655 | 0,432 |
| 60 | 800 | 5,35 | 0,845 |
| 60 | 900 | 5,27 | 1,305 |
| 80 | 650 | 7,26 | 0,359 |
| 80 | 700 | 5,71 | 0,685 |
| 80 | 750 | 5,375 | 1,165 |
| Turbinenrührer | 700 | 6,075 | 0,56 |
| .. | 800 | 5,41 | 0,736 |
| .. | 900 | 5,4 | 0,9045 |
| .. | 1000 | 5,17 | 1,4 |

Abb. 64.

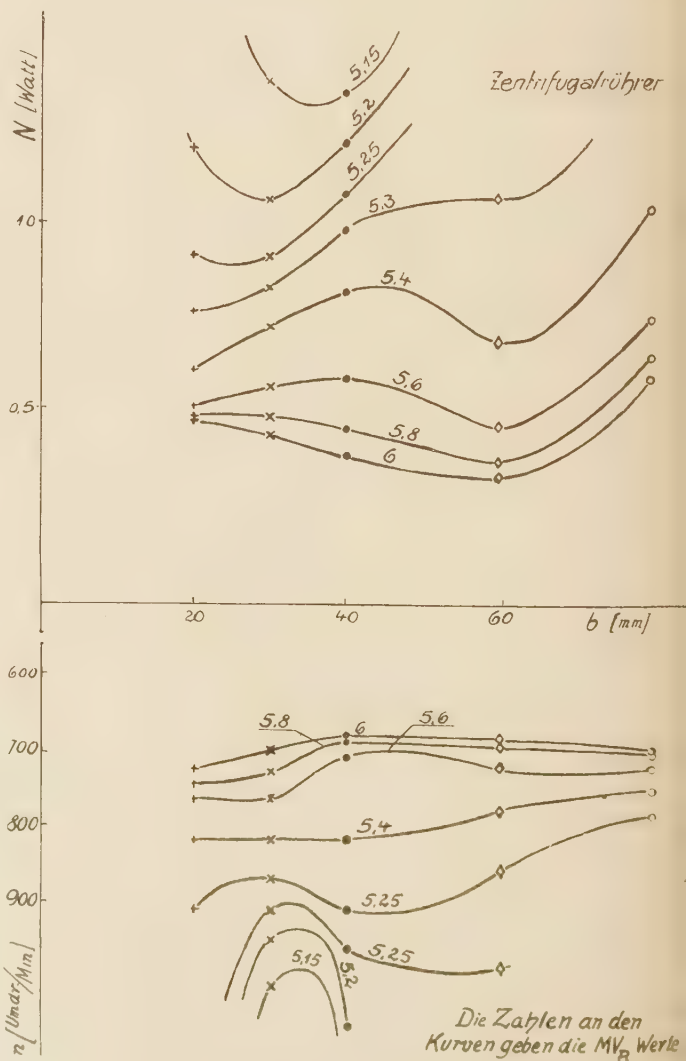






Abb. 65.

Solange also die Drehzahl, die hier, da es sich stets um denselben ∅ handelt, zugleich ein Maß der Umfangsgeschwindigkeit darstellt, gering ist, zeigt sich der Rührer überlegen, dessen Breite in einem solchen Verhältnis zur Flüssigkeitshöhe steht, daß ein einwandfreies Zufließen der geförderten Menge möglich ist. Im Versuchsfalle war das ein Rührer mit etwa 60 mm Breite. Bei Steigerung der Drehzahl treten zwei Erscheinungen auf, die auf die Förderung von Einfluß sind: 1). Neigt sich auf Grund der steigenden Rotation die Flüssigkeitsoberfläche, so ist der breite Rührer zwecklos, denn sein oberer Teil kommt mit

der Flüssigkeit garnicht mehr in Berührung. In diesem Fall ist also der Rührer einem anderen, dessen Breite nur dem benetzten Teile des ersteren entspricht, gleichzustellen, d. h. das Minimum bei 60 mm Breite verschwindet allmählich. 2). Mit höherer Umfangsgeschwindigkeit fördert ein Rührer, wie bereits in Abschn. 3 erläutert, auf einer Breite, die größer ist als die des Rührbleches. Also ist auch aus diesem Grunde mit steigender Drehzahl eine Überlegenheit bei geringerer Breite festzustellen. Unendlich kleine Breite erfordert jedoch wieder unendlich hohe Drehzahl. In diesem Falle wirkt demnach die Form der Absenkungslinie derart nachteilig, daß dort die $MV_R$ -Kurven (Abb. 63) wieder ansteigen. Für hohen Mischungsgrad von 3,15 ergibt sich so ein Minimum bei b = 36 mm, sodaß abschließend ein Rührblech 49 mm Durchm., 36 mm breit als wirtschaftlichste Größe zu bezeichnen ist.

Um die bei dem einfachen Rührblech unvermeidliche Hohlraumbildung an der Rührerwelle (Abb. 23) zu vermeiden, wurde noch eine Versuchsreihe mit einem Modell durchgeführt, das einen Verdränger an dieser Stelle besitzt. Gleichzeitig wurde die Schaufelzahl von zwei auf sechs erhöht und ihre Begrenzung zweckentsprechender gewählt, sodaß sich eine Rührerform gemäß Abb. 66 ergab. Ein Versuch mit Wasser bei n = 630 Umdr./Min. gibt hierfür das Bild Abb. 67, dessen Absenkungslinie fast die gleiche Form wie Abb. 16 aufweist, doch ist infolge der größeren Schaufelzahl die Förderhöhe beträchtlicher, was sich in einer tieferen Absenkung der Mitte bemerkbar macht. Die Mischergebnisse sind nur wenig verschieden von denen des Rührbleches gleicher Dimension. Sie sind in Abb. 63 und 64 zu finden. Die durch diese Werte punktiert gezeichnete Kurve (Bezeichnung TR in Abb. 63) fällt ab $MV_R$ = 3,4 fast völlig mit der Kurve für b = 40 mm zusammen. In dem Gebiete schlechteren Mischungsverhältnisses liegt dieser Turbinenrührer sogar um wenige Prozente ungünstiger, was wohl durch die infolge der höheren Schaufelzahl mangelnde Zerteilung der Flüssigkeitsteilchen veranlaßt ist.

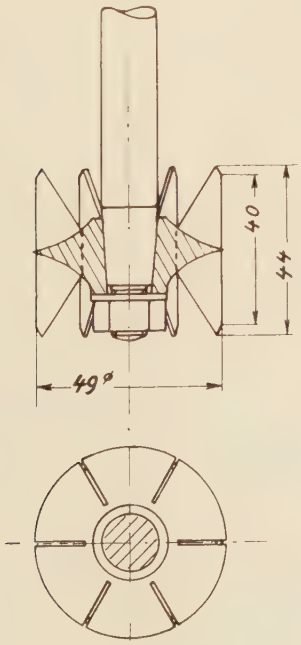



Abb. 66.

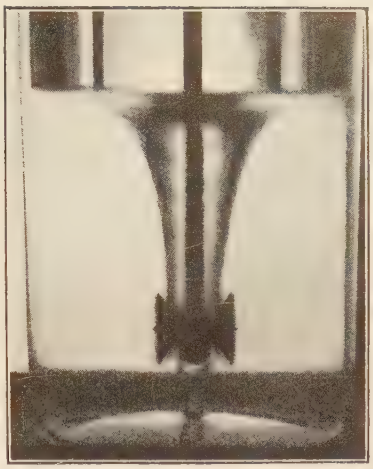


Abb. 67.

Turbinenrührer 49 mm ∅ 40 mm breit
n = 630. Inh. 5 lit. Wasser.

## C. Achsialrührer.

Die weiteren Versuche gelten der Erzeugung einer Mischbewegung im Sinne der Abb. 2 und 3 bezw. 22. Es wurde hierzu ein Leitrohr in den Abmessungen nach der Skizze Abb. 68 in dem Behälter angeordnet und in diesem Leitrohr ein Rührer eingebaut, der nach Art der Schnelläufer im Pumpenbau (Kaplanrad) achsiale Strömung erzeugt. Die Stellung dieses Rührers ist in Abb. 68 angedeutet, seine Konstruktion geht aus Abb. 69 hervor. Die Schaufeln sind also drehbar angeordnet, sodaß die Möglichkeit gegeben ist, die Schaufelwinkel zu verändern. Dagegen ist, um die Voraussetzungen für alle Versuche möglichst gleichmäßig zu halten, $\beta_1 = \beta_2$ gewählt. Desgleichen ist auf das Verwinden der Schaufelfläche verzichtet, da bei Verdrehung der Schaufeln die Verhältnisse sich doch jeweils ändern, und damit die Voraussetzungen für die Versuche, die ja im wesentlichen Vergleichswerte liefern sollen, nicht genügend übereinstimmen würden. Auf die besonderen Einflüsse einer richtig geformten Schaufel wird später noch eingegangen.

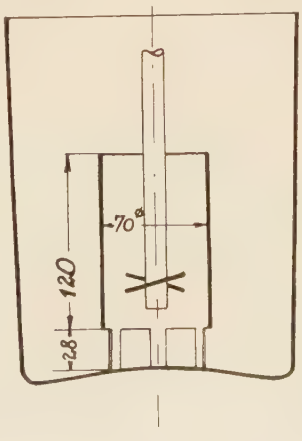



Abb. 68.

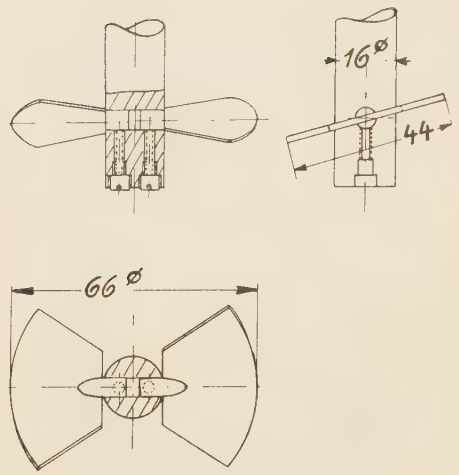



Abb. 69.

Als Versuchsflüssigkeit diente auch hier Öl und Wasser im Verhältnis 1:4. Gemessen wurde wie bei den bisherigen Versuchen das erreichte Mischverhältnis nach 5 Min. Rührdauer und zwar für verschiedene Drehzahlen und Schaufelwinkel $\beta_1$. Das Ergebnis ist in Abb. 70 für den aufwärtswirkenden Rührer zusammengestellt. Abb. 71 bringt die Werte in der bisher gewählten Darstellung N und n als Funktion von $MV_R$. Die N-Kurven liegen also um so günstiger, je kleiner der Winkel $\beta_1$ gewählt ist, und die Aufzeichnung N und n in Abhängigkeit von $\beta_1$ (Abb. 72) für jeweils konstantes $MV_R$ liefert das Ergebnis, daß ab etwa $\beta_1 = 45^0$ der Kraftbedarf bei guten Mischungsverhältnissen nur noch sehr wenig steigt. Die

**Achsialrührer aufwärtswirkend.**

| Schaufelwinkel $\beta_1$ Grad | n Umdr./Min. | $MV_R$ nach 5 Minuten Rührdauer | N Kraftbedarf an der Welle Watt |
|---|---|---|---|
| 15 | 900 | 6,84 | 0,234 |
| 15 | 1000 | 5,49 | 0,341 |
| 15 | 1100 | 5,33 | 0,54 |
| 30 | 600 | 10,55 | 0,45 |
| 30 | 700 | 6,6 | 0,76 |
| 30 | 800 | 5,445 | 1,16 |
| 30 | 900 | 5,275 | 1,925 |
| 45 | 600 | 6,79 | 0,825 |
| 45 | 800 | 5,535 | 1,79 |
| 45 | 900 | 5,31 | 2,78 |
| 60 | 600 | 8,06 | 0,979 |
| 60 | 700 | 5,77 | 1,645 |
| 60 | 800 | 5,435 | 2,36 |
| 75 | 600 | 7,3 | 1,24 |
| 75 | 700 | 5,55 | 2,08 |
| 75 | 800 | 5,26 | 2,96 |
| 90 | 600 | 8,55 | 1,355 |
| 90 | 700 | 6,03 | 1,99 |
| 90 | 800 | 5,46 | 2,62 |

Abb. 70.

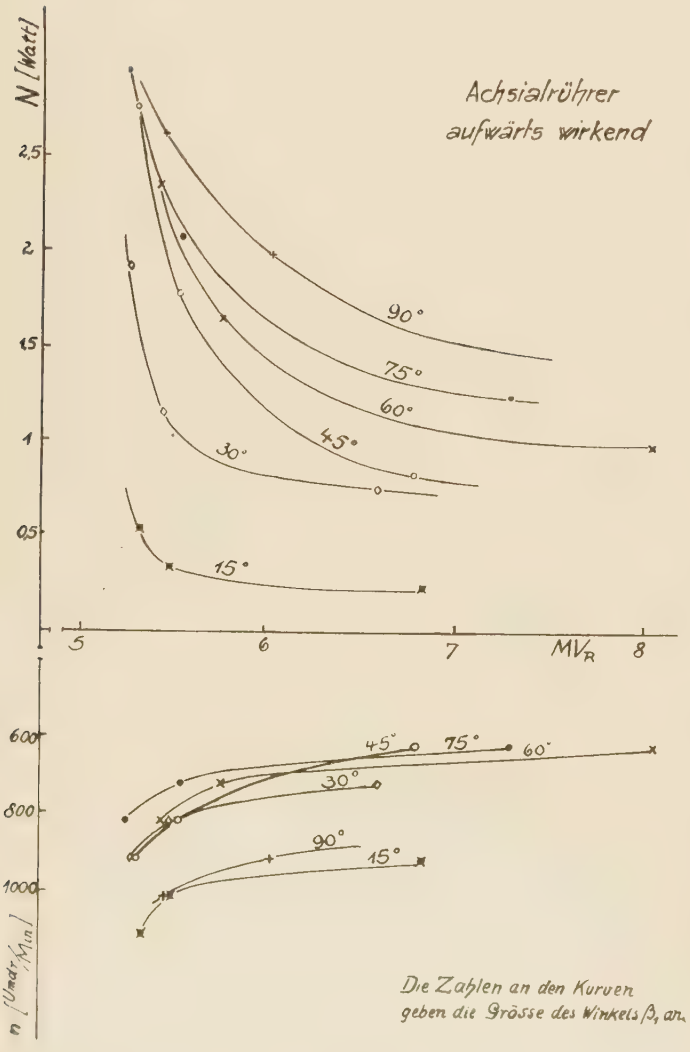



Abb. 71.

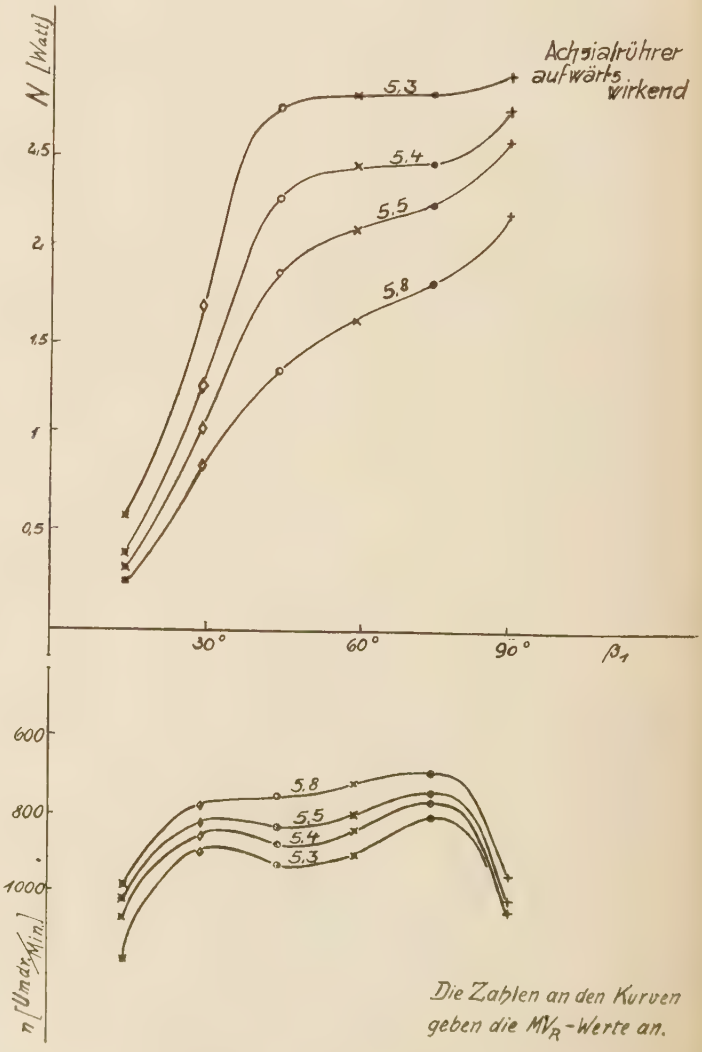



Abb. 72.

Begründung hierfür zeigt das Geschwindigkeits-Eintrittsdreieck. Legt man nämlich die Annahme zugrunde, daß zur Erzielung eines bestimmten Mischungsgrades eine bestimmte Mischgeschwindigkeit erforderlich ist, eine Voraussetzung, die nur dann volle Gültigkeit besitzt, wenn auch die Reibungs- und Flüssigkeitswiderstandsverhältnisse jeweils die gleichen sind, so liefert eine Kurve für $MV_R$ = const. in der Darstellung $n = f(\beta_1)$ (Abb. 72) für die verschiedenen Winkel $\beta_1$ Dreiecke wie in Abb. 73 angedeutet. Mit zunehmendem Winkel $\beta_1$ wird also infolge der starken Vorrotation $\alpha_1$ kleiner. Stellt man die hieraus entnommenen Werte $c_u$ in Abhängigkeit von $\beta_1$ dar, so ergibt sich eine Kurve (Abb. 74), deren Eigenart deutlich mit der N-Linie (Abb. 72) übereinstimmt. Sowohl die Tatsache, daß der kleinere Winkel $\beta_1$ dem größeren überlegen ist, wie auch das Abbiegen der N-Kurven in Abb. 72 bei $\beta_1 = 45^0$ ist also begründet durch die Drehbewegung der Flüssigkeit, die um so geringer wird, je kleiner $\beta_1$ gewählt ist. Jedoch ist auch hier nicht außer Acht zu lassen, daß die Herabsetzung des Wertes $c_u$ und damit des Kraftbedarfes nur mit einer Erhöhung der Drehzahl erkauft werden kann, wodurch der beim Zentrifugalrührer bereits erwähnte Einfluß der mechanischen Reibungsarbeit wieder in den Vordergrund rückt.

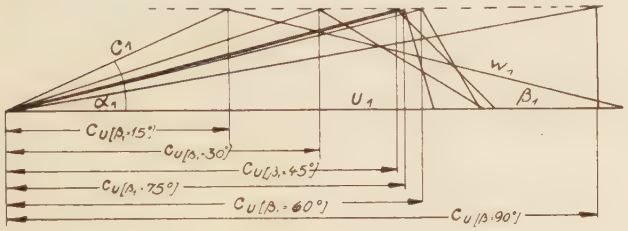



Abb. 73.

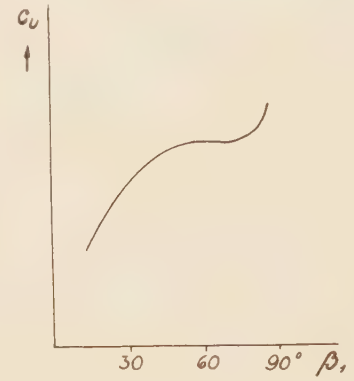



Abb. 74.

Der abwärtsarbeitende Rührer liefert bei kleinem Winkel $\beta_1$ zunächst Kurven für N und n als Funktion von $MV_R$ und $\beta_1$ (Abb. 75, 76 und 77, ausgezogene Kurven) ähnlicher Art. Jedoch steigen hier die Werte nach 45° zu bereits ab $MV_R = 5{,}5$ steil an. Die

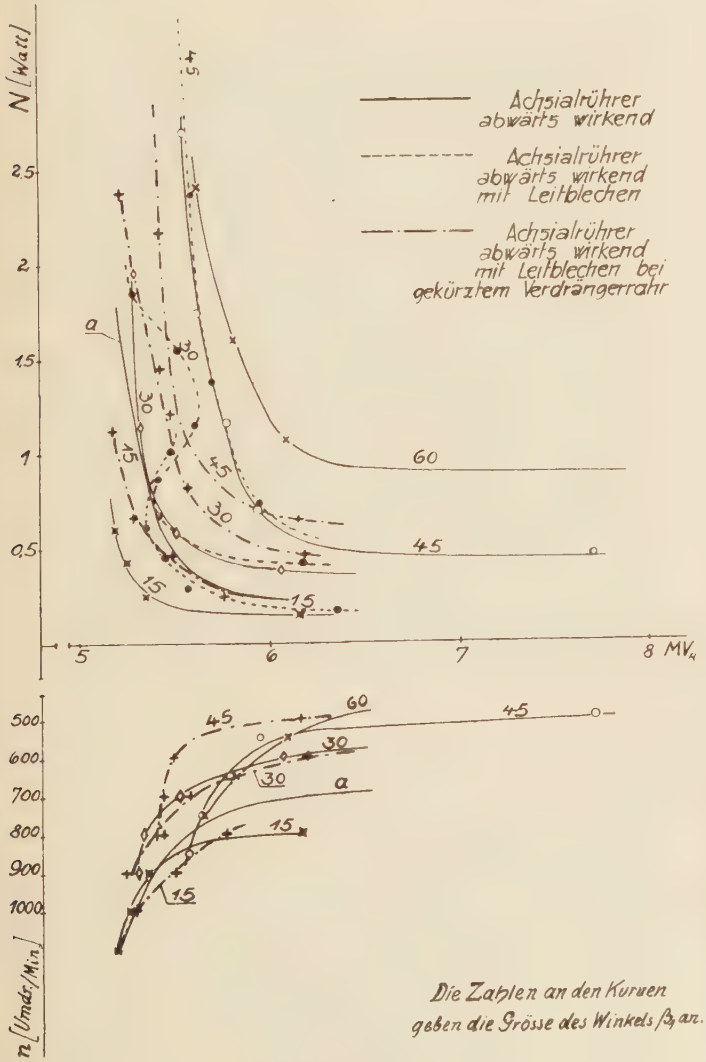



Abb. 75.

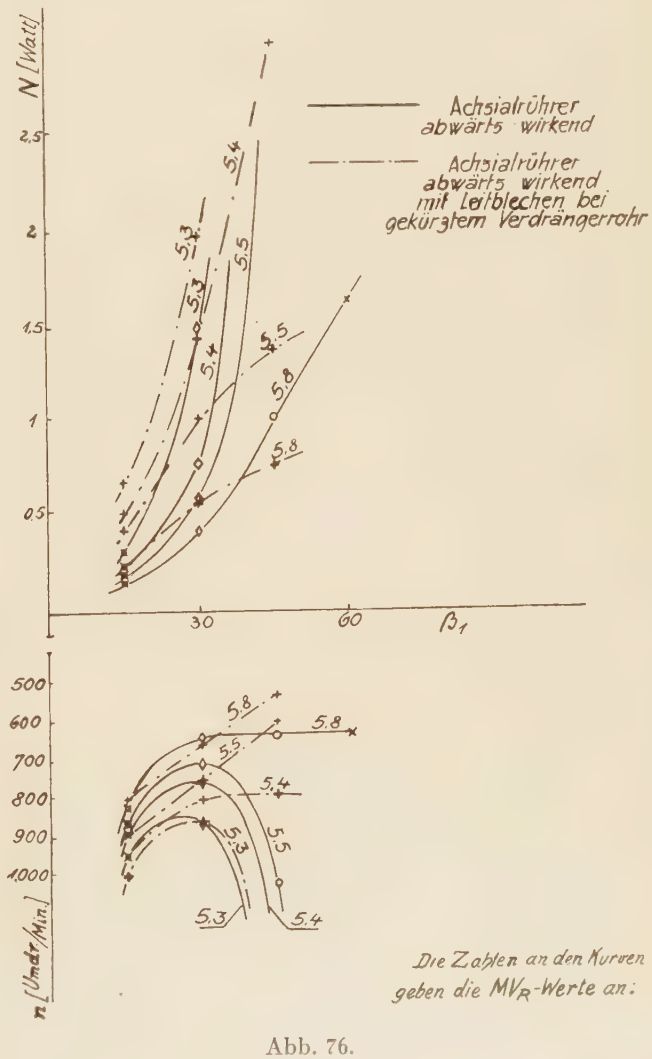



Abb. 76.

Ursache zu diesem abweichenden Verhalten liegt darin, daß bei stärkerer Absenkung (vergl. Abb. 28), wie in Abschn. 3 bereits ausführlich erörtert, der erforderliche Zufluß nicht mehr gewährleistet ist. Ferner ist festzustellen, daß der Kraftbedarf in dem Bereiche bis etwa 30°, also solange noch ausreichender Zufluß gesichert ist, für den abwärtsarbeitenden Rührer ein wenig günstiger ist als für den aufwärtsarbeitenden. Der Grund hierfür liegt in der in Abschn. 3 erwähnten Tatsache, daß beim Aufwärtsarbeiten eine höhere Mischgeschwindigkeit erzeugt werden muß.

**Achsialrührer abwärtswirkend.**

| Schaufelwinkel $\beta_1$ Grad | n Umdr./Min. | $MV_R$ nach 5 Minuten Rührdauer | N Kraftbedarf an der Welle Watt |
|---|---|---|---|
| 15 | 700 | 8,72 | 0,048 |
| 15 | 800 | 6,16 | 0,15 |
| 15 | 900 | 5,35 | 0,243 |
| 15 | 1000 | 5,25 | 0,424 |
| 15 | 1100 | 5,19 | 0,6 |
| 30 | 600 | 6,06 | 0,387 |
| 30 | 700 | 5,51 | 0,594 |
| 30 | 800 | 5,33 | 1,14 |
| 30 | 900 | 5,3 | 1,965 |
| 45 | 500 | 7,71 | 0,453 |
| 45 | 550 | 5,94 | 0,7 |
| 45 | 650 | 5,78 | 1,16 |
| 45 | 750 | 5,63 | 1,745 |
| 45 | 850 | 5,56 | 2,7 |
| 60 | 450 | 13,3 | 0,6 |
| 60 | 550 | 6,09 | 1,06 |
| 60 | 650 | 5,82 | 1,6 |
| 60 | 750 | 5,63 | 2,41 |
| Mit Leitblechen und verkürztem Verdränger: | | | |
| 15 | 800 | 5,76 | 0,242 |
| 15 | 900 | 5,49 | 0,46 |
| 15 | 1000 | 5,29 | 0,663 |
| 15 | 1100 | 5,18 | 1,115 |
| 30 | 600 | 6,18 | 0,473 |
| 30 | 700 | 5,57 | 0,812 |
| 30 | 800 | 5,43 | 1,445 |
| 30 | 900 | 5,22 | 2,38 |
| 45 | 500 | 6,15 | 0,651 |
| 45 | 600 | 5,48 | 1,21 |
| 45 | 700 | 5,43 | 2,17 |
| 45 | 800 | 5,39 | 3,55 |
| Gewölbte Schaufeln mit Leitblechen und verkürztem Verdränger: | | | |
| 15 | 700 | 6,19 | 0,205 |
| 15 | 800 | 5,53 | 0,439 |
| 15 | 900 | 5,39 | 0,824 |
| 15 | 1000 | 5,29 | 1,18 |
| 15 | 1100 | 5,22 | 1,69 |

Abb. 77.

Das starke Mitrotieren der Flüssigkeit bei größerem Winkel $\beta_1$ und die dadurch hervorgerufenen kleinen Werte für $\alpha_1$ (Abb. 73) zwingen also, will man nicht unwirtschaftlich arbeiten, dazu, mit kleinem $\sphericalangle \beta_1$ und dementsprechend hoher Drehzahl zu arbeiten. Gerade das wird vielleicht als Nachteil empfunden. Es erscheint deshalb erstrebenswert, durch Einbau von Leitvorrichtungen den Winkel $\alpha_1$ groß zu halten, ein Gedanke, der auch der Patentschrift Nr. 473 404 zugrunde liegt. Wie Abb. 73 zeigt, wird diese Maßnahme bei kleinem Winkel $\beta_1$, bei dem ohnedies der Winkel $\alpha_1$ schon groß ist, keinen wesentlichen Vorteil bringen; dagegen muß bei größerem $\beta_1$ das Geschwindigkeitsdiagramm eine erheblich andere Form annehmen. Um diese Verhältnisse versuchsmäßig zu belegen, wurden zwei Leitbleche in das Verdrängerrohr eingebaut (Abb. 78). Die Versuche hiermit geben zunächst für N in Abhängigkeit von $MV_R$ die in Abb. 75 punktiert eingezeichneten Kurven, die ein recht unterschiedliches Verhalten aufweisen und teilweise sogar mit zunehmender Drehzahl schlechtere Mischungsgrade ergeben. Es ist dies durch die infolge des zusätzlichen Widerstandes erforderliche größere Druckhöhe bedingt. Erst bei weiterer Steigerung der Drehzahl wird die erforderliche Druckhöhe geschaffen, um eine größere Fördermenge und damit höheren Mischungsgrad zu erzielen. Bei $\beta_1 = 45°$ ist die Mischgeschwindigkeit bereits bei geringer Drehzahl so hoch, daß bei weitem nicht die erforderliche Menge nachströmen kann und dementsprechend nur fast die gleichen Ergebnisse erreicht werden, wie ohne Leitbleche. Gerade aus diesem Verhalten geht hervor, wie ausschlaggebend die Bemessung der Einbauten für die Erzielung eines hohen Mischungsgrades ist. Ungünstige Rückströmungsverhältnisse können unter Umständen zur Erzielung eines günstigen MV nicht nur den erforderlichen Kraftbedarf gewaltig steigern, sondern das Erreichen dieses Mischungsverhältnisses geradezu unmöglich machen.

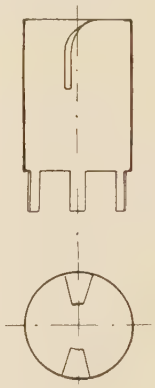


Abb. 78.

Um die durch den mangelnden Zufluß aufgetretenen Schwierigkeiten auszuschalten, wurde der Verdränger um 15 mm gekürzt und nun die Versuche unter sonst gleichen Bedingungen wie vorher beschrieben wiederholt. Das Ergebnis hiervon ist in den strichpunktierten Kurven Abb. 75 und 77 festgelegt. Der Kraftbedarf liegt demnach für $\beta_1 = 15$ und 30° um einiges höher als bei den Versuchen ohne Leitblech, während bei $\beta_1 = 45°$ bereits ein ganz erheblicher Arbeitsgewinn durch die Vergrößerung von $\alpha_1$ festzustellen ist. Durch das ständige Abbremsen der Drehbewegung durch die Leitbleche und die hierauf wieder erfolgende Beschleunigung der Masse entsteht demnach ein derartiger Mehrbedarf an Kraft, daß die Vorteile des großen Winkels $\alpha_1$ bei $\beta_1 = 15$ und 30° durch die größere Widerstandshöhe aufgewogen werden, was bei $\beta_1 = 45°$ nicht mehr zutrifft. Dort ist in den n-Kurven (Abb. 75 strich-punktiert) auch der starke Abfall gegenüber den gleichen Werten ohne Leitblech zu beobachten. Es fällt jedoch auf, daß auch hier die N-Kurve im Bereiche besseren Mischungsgrades sehr steil ansteigt, also in diesem Gebiet für $\beta_1 = 45°$ der Zufluß auch jetzt noch ungenügend zu werden beginnt.

Abb. 79.
Achsialrührer abwärts wirkend
$\beta_1 = 15^0$, mit Leitblechen, n = 400, Inh. 5 lit. Wasser u. Aluminiumpulver.

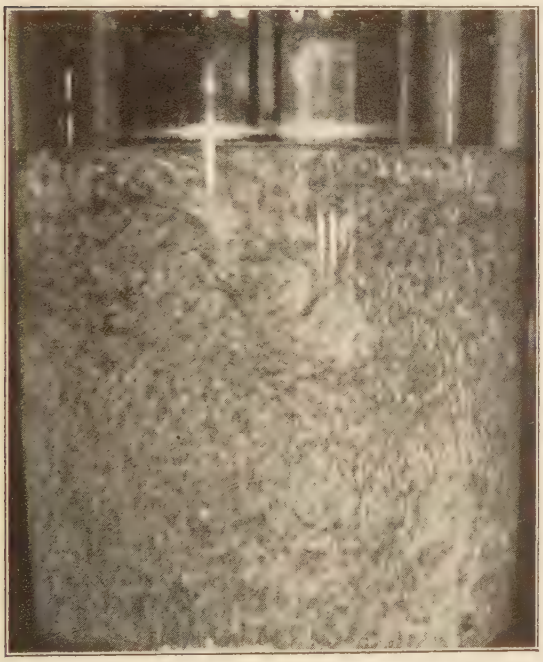


Abb. 80.
Achsialrührer abwärts wirkend
$\beta_1 = 15^0$, mit Leitblechen, n = 600, Inh. 5 lit. Wasser u. Aluminiumpulver.

Das mit Aluminumpulver erzeugte Strömungsbild am Rande des Behälters beim Arbeiten mit den Leitblechen zeigen die Abb. 79 und 80 bei n = 400 und 600 Umdr./Min. für diesen Fall. Während in Abb. 39 die starke Rotation in dem Raum R (Abb. 22) zu erkennen war, ist jetzt diese Bewegung durch die Leitbleche stark abgeschwächt, sodaß im wesentlichen nur ein Abwärtsströmen in diesem Gebiete wahrzunehmen ist. Die Strömungsbahnen sind jedoch stark zerklüftet, denn durch das Abbremsen der Flüssigkeit wird eine lebhafte Wirbelbildung ausgelöst, deren nachteiliger Einfluß auch in dem Mehrbedarf an Kraft zum Ausdruck kommt.

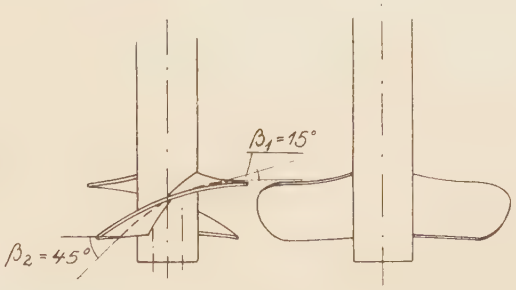



Abb. 81.

Um den besonderen Einfluß eines gewölbten Kaplanrades gegenüber den bisher verwendeten geraden Schaufeln zu erproben, folgt noch eine Versuchsreihe mit einem Rührer nach Abb. 81 mit Schaufelwinkeln $\beta_1$ und $\beta_2$ von im Mittel 15 bezw. 45° und zwar bei Verwendung von Leitblechen. Sie ergab die in Abb. 75 Kurve a und Abb. 77 eingetragenen Werte. Der nunmehr vorhandene Unterschied von $\beta_1$ und $\beta_2$ steigert auch den Wert $(c_{u2} - c_{u1})$ und damit die Förderhöhe. Dementsprechend fließt dem Rührer mehr zu als bei nicht gewölbter Schaufel. Der vermehrte Zufluß erzeugt auch zunächst bei Drehzahlen bis etwa 900/Min. günstigere Mischverhältnisse, allerdings bei höherem Kraftverbrauch. Bei n = 1000 und darüber verschwindet jedoch auch dieser Vorteil, denn nun wird die Absenkungskurve so steil, daß trotz größerer Förderhöhe kein vermehrter Zufluß möglich ist und es bleibt lediglich der höhere Kraftbedarf gegenüber der geraden Schaufel.

Wenn diese gewölbten Schaufeln hier wider Erwarten ungünstigere Werte liefern, so liegt das offenbar daran, daß $\beta_2$ zu groß gewählt wurde, was durch die nachfolgende Rechnung auch bewiesen wird. Die Versuchsergebnisse zeigen aber gleichzeitig, daß kein wesentlicher Fehler durch die Verwendung der geraden Schaufeln gemacht wurde. Bei einer betriebsmäßigen Ausführung wird man dagegen mit vollem Recht die Schaufelform nach den im Wasserkraftmaschinenbau üblichen Grundsätzen festlegen, da bei einer Großausführung die Nachteile dieser ungenauen Form sich erheblich stärker auswirken und bei längerer Rührdauer auch Korrosionserscheinungen durch Kavitation die Folge sein würden.

Zur rechnerischen Ermittelung der tatsächlichen Mischgeschwindigkeit für gutes Mischverhältnis sei ein Versuchspunkt herausgegriffen. Bei $MV_R = 5{,}2$ benötigte der Achsialrührer mit $\beta_1 = 15^0$ abwärtswirkend (Abb. 75) einen Kraftbedarf von 0,55 Watt bei n = 1070 Umdr./Min. Auf Grund der Form des Laufrades sei eine spez. Drehzahl $n_s = 1000$ zu Grunde gelegt. Es ergibt sich dann mit $\eta = 0{,}6$ nach der Formel $n_s = \frac{n\sqrt{Nn}}{H^{5/4}}$ H = 0.0483 m.

Aus der Gleichung 11 folgt weiter Q = 0,000725 m³/Sek.

Bei dem Behälterdurchmesser von im Mittel 18,6 cm ergibt sich hiernach mit einem Werte $\xi_1$ (vergl. Seite 11) von 0,75 eine mittlere Mischgeschwindigkeit

$$v_0 \quad \frac{725}{136 \cdot 0{,}75} \quad 7{,}1 \text{ cm/Sek.}$$

Nach dem Hauptsatz $H_{th} = \frac{u}{g}\ (c_{3u} - c_{0u})$ ist also wenn man einen hydraulischen Wirkungsgrad $\eta_h = 0{,}8$ zu Grunde legt und $c_{0u} = c_{1u}$ setzt, was mit einiger Annäherung zulässig ist,

$$c_{3u} = \frac{4{,}83 \cdot 981}{269 \cdot 0{,}8} + 200$$
$$= 2{,}220 \text{ m/Sek.}$$

Hieraus folgt tg. $\beta_3 = \frac{0{,}2}{0{,}47}$ ; $\beta_3 = \sim 23^0$.

Der Austrittswinkel $\beta_2$ wäre also mit etwa 23° richtig gewählt.

Legt man die gleiche spezifische Drehzahl $n_s = 1000$ auch für das Rührblech 49 mm ∅ 40 mm Breite zu Grunde, also für jeden Teil dieses doppelt wirkenden Schaufelrades ein $n_s = \sim 700$, so ergibt sich für die gleichen Werte $\eta = 0{,}6$ und $MV_R = 5{,}2$ gemäß den Daten $N = 1{,}2$ und $n = 1020$ aus Abb. 65

$$H = 0{,}0635 \text{ m}$$

und demnach $Q = 0{,}0012$ m³/Sek.

Hieraus folgt mit $\xi_2 = 0{,}65$ eine mittlere Mischgeschwindigkeit

$$v_0 = \frac{1200}{272 \cdot 0{,}65} = 6{,}8 \text{ cm/Sek.}$$

Stellt man die so ermittelten Werte in Gleichung 11 dar, so ergibt sich für $\xi_1 = 0{,}75$ u. $v_0 = 7{,}1$ cm/Sek.

$$\zeta_1 = \frac{4{,}83 \cdot 2\,g}{7{,}1^2} = 189,$$

und für $\xi_2 = 0{,}65$ u. $v_0 = 6{,}8$ cm/Sek.

$$\zeta_1 = \frac{6{,}35 \cdot 2\,g}{6{,}8^2} = 260$$

# Zusammenfassung.

Übereinstimmend für alle untersuchten Rührerformen erweist sich also die Tatsache, daß immer die geringsten Größen, also kleinster Durchmesser und kleinster Winkel $\beta_1$ den besten Mischungsgrad bei niedrigstem Arbeitsaufwand erzielen. Sie erfordern aber hierzu auch jeweils sehr hohe Drehzahlen, die sich asymptotisch dem Wert ∞ nähern. Durch die Bestimmung der auf Grund der Antriebskonstruktion größtmöglichen Drehzahl ist somit der erforderliche Mindestkraftbedarf und die hierfür nötige Bemessung des Rührers in wesentlichen Punkten festgelegt, wobei Voraussetzung ist, daß die zur Einleitung des Mischvorganges erforderliche Geschwindigkeit erzeugt wird. Wie groß der Vorteil ist, den die Anwendung hoher Drehzahlen bietet, geht aus den in Abschn. 4 behandelten Versuchsergebnissen hervor. Er liegt nicht allein in der Kraftersparnis, sondern auch in der aufzuwendenden geringeren Rührzeit; höhere Drehzahlen ermöglichen es also, das gleiche Mischergebnis in einem Behälter kleinerer Abmessung zu erreichen.

Stellt man nun von den drei im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Rührern die jeweils besten Werte in der auch bisher verwendeten Darstellung N und n in Abhängigkeit von $MV_R$ einander gegenüber (Abb. 82), so ergeben sich auch hier noch erhebliche Unterschiede. Daß der aufwärtsarbeitende Achsialrührer dem abwärtsarbeitenden bezüglich Kraftbedarf und Drehzahl überlegen ist, wurde bereits in Abschnitt 3 näher erläutert. Ebenso ist der um etwa 100% höhere Kraftbedarf des Zentrifugalrührers gegenüber dem abwärtsarbeitenden Achsialrührer durch das in Abschn. 3 entwickelte Erfordernis der annähernd doppelten Fördermenge bei gleicher Mischgeschwindigkeit und die größere Massenrotation zu erklären. Nach Abb. 82 benötigt der abwärtsarbeitende Achsialrührer eine höhere Drehzahl als das Rührblech; doch verschwindet bei höherem MV auch dieser Nachteil. Der abwärtsarbeitende Achsialrührer mit einem Schaufelwinkel $\beta_1 = 15^0$ ist demnach für den Versuchsfall als wirtschaftlich günstigste Form anzusprechen.

Für die allgemeine Verwendung ist hier aber einschränkend zu bemerken, daß, wie in Abschn. 3 erklärt, und in Abschn. 4 C durch den Versuch bewiesen, die einwandfreie Festlegung der Strömung und damit die richtige Dimensionierung des Verdrängers schwierig aber von ausschlaggebender Bedeutung für das wirklich vorteilhafte Arbeiten des abwärtswirkenden Achsialrührers ist. Deshalb wird man in allen Fällen, in denen in dieser Richtung nicht durch Versuche oder bereits vorhandene Ausführungen genügend Klarheit geschaffen werden kann, oft günstiger mit dem Rührblech arbeiten, das zudem durch seine überaus einfache Konstruktion nicht zu unterschätzende Vorteile bietet.

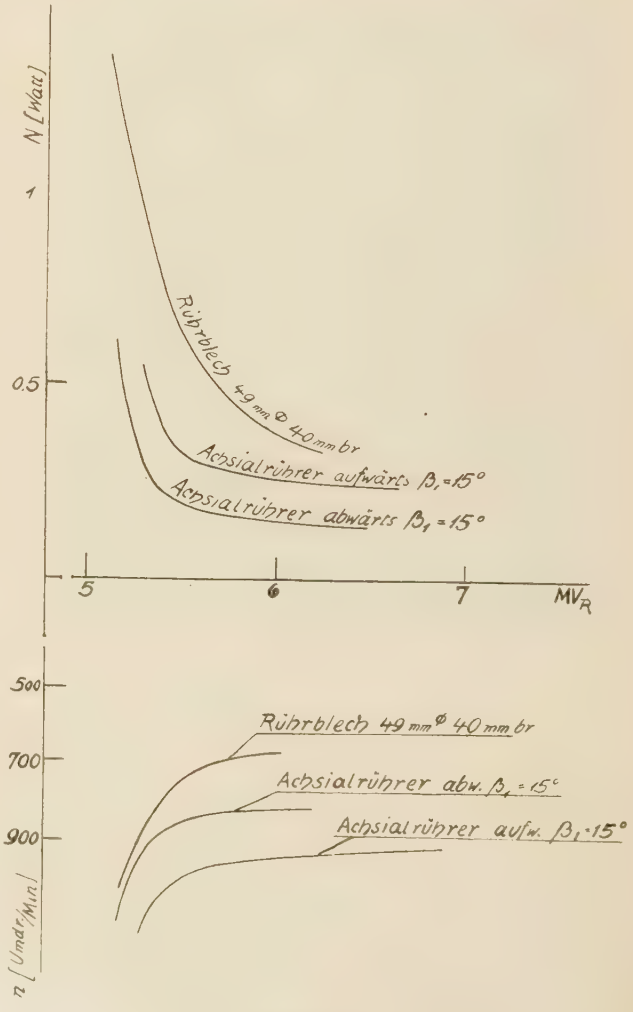



Abb. 82.

# Literaturverzeichnis.


1.) C. Pfleiderer, die Kreiselpumpen, Verlag Julius Springer, Berlin 1932.

2.) Thomann, die Wasserturbinen u. Turbinenpumpen, Verlag Konrad Wittwer 1931.

3.) Kaufmann, Angewandte Hydromechanik, Verlag Julius Springer, Berlin 1931.


# Lebenslauf.

Geburtsdatum: 13. 2. 1899 in Breslau.

Schulbesuch: April 1905 bis April 1915 Johannesgymnasium in Breslau von der ersten Vorschluklasse bis zur Unterprimareife und von April 1916 bis April 1917 in der Oberprima bis zur Reifeprüfung.

Praktische Arbeitszeit: Eisenbahn-Hauptwerkstatt 1 Breslau von April bis Dezember 1915 und von April bis Juli 1917.

Militärdienst: Juli 1917 bis April 1919 bei Kraftwagen-Fernsprech-Bauzug 997 in Rumänien, der Ukraine und auf dem westlichen Kriegsschauplatz, nach Kriegsende bei der Nachrichtenabt. 6 Breslau-Carlowitz.

Studium: Sommer-Semester 1919 bis Sommer-Semester 1923 an der Technischen Hochschule Breslau Abteilung Maschinenbau.

Diplomprüfung: Juli 1923.

Berufslaufbahn:

1. August 1923 bis 31. Mai 1924 Linke-Hofmann-Lauchhammer A.G. Werk Breslau Abt. Maschinenbau.

1. Juni 1924 bis 30. September 1925 Waggon- und Maschinenbau A.G. Görlitz Abt. Maschinenbau.

1. Oktober 1925 bis 22. Dezember 1931 I.G. Farbenindustrie A.G. Ludwigshafen Rh.

1. Januar 1932 bis 31. Oktober 1933 Technische Hochschule Breslau, Lehrstuhl für Wasserkraftmaschinen und -Anlagen

ab 1. November 1933 I.G. Farbenindustrie A.G. Ludwigshafen Rh.